

УДК 66.011

ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ АБСОРБЦИИ ПАРА РАСТВОРОМ, СОДЕРЖАЩИМ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫЕ ДОБАВКИ

В.Е. Накоряков, Н.И. Григорьева, Н.С. Буфетов, Р.А. Дехтярь

*Лаборатория проблем тепломассопереноса,
Институт теплофизики Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия*

Аннотация

Приведены результаты экспериментального исследования механизмов влияния поверхностно-активных добавок на тепломассоперенос при абсорбции пара раствором соли в условиях работы абсорбера теплового насоса. Исследовалась абсорбция водяного пара первоначально неподвижным слоем водного раствора бромистого лития с добавками в качестве ПАВ *n*-октанола с концентрацией 25-400 ppm (как меньшей, так и большей предела растворимости). С помощью тепловизионной техники получены термограммы перемещающейся в процессе абсорбции поверхности слоя. При концентрациях, меньших предела растворимости, подтверждена гипотеза засаливания поверхности («salting out»). Проанализированы данные о поверхностном натяжении раствора бромистого лития, содержащего небольшие добавки *n*-октанола.

1. Введение

Абсорбер является важнейшей составной частью абсорбционного теплового насоса и холодильной машины. Наиболее распространенной и эффективной рабочей системой, используемой в таких аппаратах, является система: водный раствор бромистого лития (LiBr) – водяной пар. Чаще всего процесс абсорбции пара осуществляется при стекании пленок раствора (пленочная абсорбция) по поверхности труб. Специфические свойства раствора бромистого лития являются причиной использования в абсорберах дорогостоящих материалов труб. Уменьшение количества труб а, следовательно, снижение металлоемкости и стоимости абсорбера возможно за счет новых способов интенсификации процессов тепломассопереноса при абсорбции.

Одним из таких способов является введение в раствор поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые приводят к возникновению мелкомасштабной поверхностной конвекции и, как следствие, к интенсификации переноса теплоты и массы. Однако в экспериментах по исследованию влияния поверхностно-активных веществ на интенсивность пленочной абсорбции трудно разделить вклад в тепло- и массоперенос основного течения и приповерхностной конвекции. В этом случае удобным объектом исследования является абсорбция пара неподвижным слоем раствора, когда исключается вынужденное течение. Ранее были представлены теоретические и экспериментальные данные по локальным характеристикам тепло- и массопереноса при абсорбции неподвижным слоем раствора в отсутствие ПАВ [1] - [2], которые в дальнейшем служат эталоном для сравнения с результатами, полученными при наличии в растворе ПАВ. В [3] - [4] такое сравнение проведено только для одной интегральной характеристики (для изменения массы абсорбируемого вещества во времени).

2. Экспериментальная установка и методы измерений

Для получения данных по влиянию ПАВ на локальные характеристики тепло и массопереноса и для выяснения механизма этого влияния были проведены экспериментальные исследования по абсорбции водяного пара первоначально неподвижным слоем водного раствора бромистого лития с добавками в качестве ПАВ *n*-октанола с концентрацией 25-400 ppm (как меньшей, так и большей предела растворимости). Экспериментальные исследования сначала проводились на установке, подробно описанной в [1], а затем на установке с модернизированным абсорбером (рис.1).

На установке [1] абсорбер представлял собой цилиндрический сосуд диаметром 165мм и высотой 87мм, выполненный из нержавеющей стали. Измерения температуры внутри слоя проводи-

лись термопарами. Пять термопар в защитных кожухах в виде капиллярных трубок диаметром 1 мм вводились через боковые стенки абсорбера по радиусу в слой абсорбента и располагались там со смещением друг относительно друга в горизонтальной плоскости на 36 градусов с шагом по высоте 5 мм. Нижний капилляр располагался около дна, касаясь его, а верхний – на высоте 20 мм. Концентрированный раствор LiBr заливался в абсорбер в таком количестве (0.855 ± 0.025 кг), чтобы защитный кожух верхней термопары был покрыт слоем 0.2 – 0.5 мм.

Термопары изготавливались из медной и константановой проволоки диаметрами 0.16 и 0.1 мм соответственно. Индивидуальная градуировка позволяла измерять температуру с погрешностью не более 0.1°C.

Для получения данных о распределении концентрации раствора в слое был предусмотрен отбор проб с разных уровней слоя. Пробоотборниками служили трубки диаметром 2 мм с заглушенными торцами и просверленными на боковой поверхности отверстиями диаметром 0.8 мм. Пробоотборные трубки располагались так, чтобы забор раствора осуществлялся с заданного уровня, а отверстия были направлены вверх. Такое расположение обеспечивало наименьшее перемешивание раствора при его послойном сливе.

Модернизация абсорбера была проведена для устранения влияния температуры металлических стенок абсорбера на распределение температуры по поверхности слоя в процессе абсорбции. Модернизированная установка состоит из вакуумной камеры 1, кюветы с раствором бромистого лития (LiBr) 2, генератора пара 3, клапана для подачи пара 4. Вакуумная камера 1 представляла собой цилиндр, изготовленный из нержавеющей стали, диаметром 180 мм и высотой 90 мм, снабжённый одним боковым смотровым окном и двумя окнами сверху и снизу.

Эксперименты проводились с раствором с начальной концентрацией LiBr, равной 58 %. Раствор заливался в круглую кювету, диаметр дна которой 70 мм и толщина 15 мм. Дном служило оптическое стекло. Высота заливаемого раствора составляла 20 мм. Стенки кюветы изготавливались из тонкой (40 мкм) прозрачной пленки.

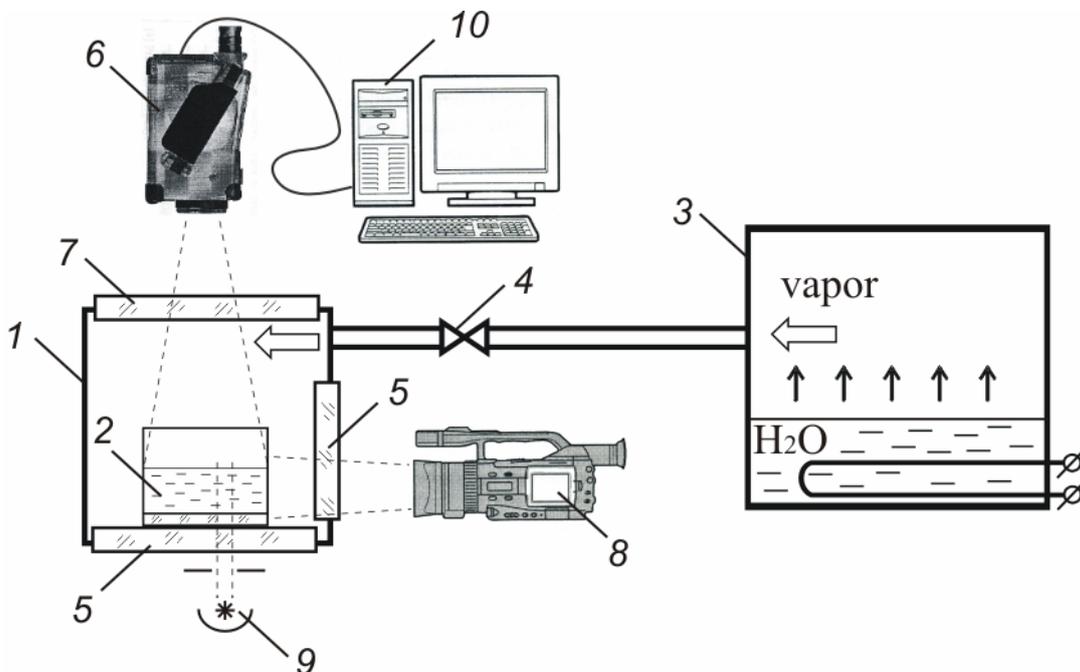


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – вакуумная камера, 2 – кювета, 3 – генератор пара, 4 – клапан, 5 – смотровые окна, 6 – инфракрасная (ИК) камера, 7 – инфракрасное стекло, 8 – видеокамера, 9 – световой нож, 10 – персональный компьютер.

Через верхнее окно 5 проводились бесконтактные дистанционные измерения температуры перемещающейся межфазной границы раствора LiBr с помощью современной инфракрасной (ИК) камеры 6 – тепловизора NEC 7102WX. Регистрируемый диапазон инфракрасного излучения составлял 8-14 мкм. Излучение с поверхности раствора бромистого лития проходило через окно 7 и попадало в объектив ИК камеры. Прозрачным для инфракрасного излучения окном служило стекло, изготовленное из LiF, диаметром 140 мм и толщиной 20 мм. Через боковое смотровое окно 6 проводились визуальные видеосъемка, наблюдения, контроль и измерение уровня слоя. Видеосъемка осуществлялась видеокамерой 8 Canon XM2, для чего в раствор вводились мелкие метки, которые подсвечивались плоским световым ножом 9 через нижнее смотровое окно, изготовленное из оптического стекла.

Экспериментальная установка была оснащена автоматизированной системой сбора информации и поддержания необходимых условий, а также системой обработки результатов на компьютере 10.

Генератором пара служил сосуд объемом около 20 л, на дне которого были размещены нагреватели для выпаривания воды из раствора LiBr. Процесс абсорбции начинался после открытия клапана 5 и поступления пара в вакуумную камеру 1. Давление пара в вакуумной камере поддерживалось около 2 кПа. Компьютерное управление источником питания генератора позволяло поддерживать давление в системе постоянным с точностью ± 5 Па. Это давало возможность использовать генератор пара в качестве баростата, что контролировалось разностным мембранным низкопределным датчиком давления.

Для калибровки ИК камеры в поле зрения помещались два эталонных излучателя, один из которых нагревался, а другой нет. Излучатели представляли собой цилиндры диаметром 10 мм и высотой 10 мм, изготовленные из меди, в один из которых помещался микронагреватель. Излучающие поверхности цилиндров были зачернены ламповой сажей. Их температура измерялась зачеченными термопарами.

Длительное термостатирование в течении не менее 12 часов обеспечивало перед началом эксперимента постоянную температуру в слое и отсутствие конвективных потоков в жидкости.

3. Экспериментальные результаты

Проведено более двадцати серий экспериментов продолжительностью: от 30 минут до 20 часов в условиях, характерных для работы тепловых насосов и холодильных машин.

В результате проведенных исследований получены профили температуры и концентрации абсорбируемого вещества (воды) в слое раствора в различные моменты времени.

На рис. 2 приведены профили температуры, измеренные термопарами в различные моменты времени для концентрации *n*-октанола (100 ppm). По характеру они мало отличаются от аналогичных профилей в отсутствие в растворе ПАВ. В начальный период процесса абсорбции профиль температуры вогнутый, через 1000 с становится линейным и остается линейным на протяжении всего эксперимента. Причем температура вблизи поверхности слоя на малых временах практически не меняется, а затем со временем уменьшается. Температура около дна практически постоянна.

Количественное сравнение с аналогичными результатами без ПАВ (рис. 3) показало, что наличие в растворе ПАВ приводит к увеличению температуры на всех уровнях слоя, в том числе и на перемещающейся поверхности слоя. На рис. 3 результаты измерения температуры поверхности слоя с помощью тепловизора представлены кривыми 6 (без ПАВ) и с 7 (с ПАВ). Если предположить, что межфазная граница находится в состоянии термодинамического равновесия и наличие ПАВ никак не влияет на это состояние, то увеличение температуры поверхности слоя при фиксированном давлении пара соответствует (см. например, данные о термодинамическом равновесии в системе: водный раствор бромистого лития – водяной пар [5]) снижению концентрации воды вблизи поверхности слоя (увеличению концентрации соли).

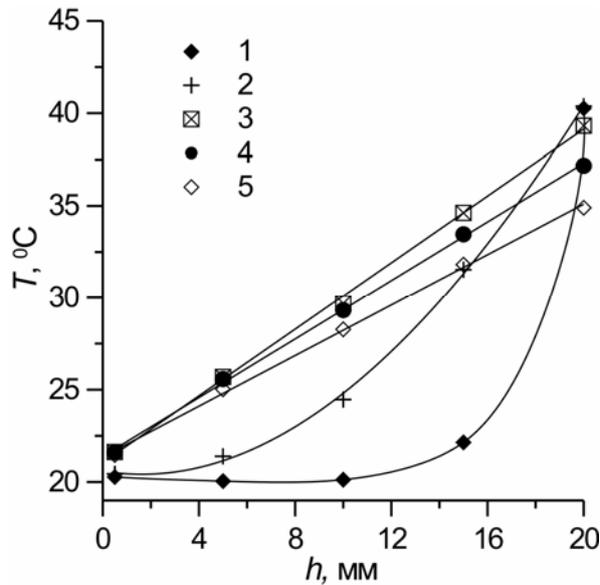


Рис. 2. Профили температуры $t = 21.4$ (1), 60.4 (2), 204 (3), 515 (4), 1019 (5), 2020 (6) и 3715 с (7).

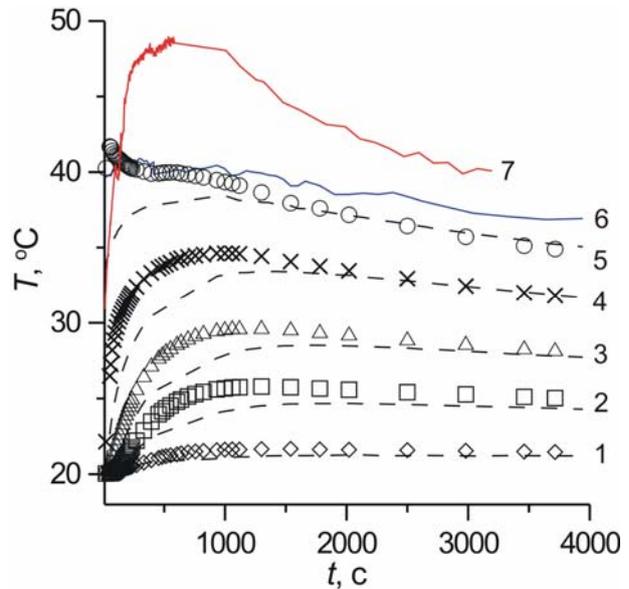


Рис. 3. Зависимость температуры от времени на различных расстояниях от дна $h = 0.5$ (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4), и 20 мм (5), кривая 6 – температура поверхности для раствора без ПАВ, точки – экспериментальные данные для раствора с ПАВ, пунктирные кривые соответствуют данным для раствора без ПАВ.

Это подтверждается и измерениями профиля концентрации воды в растворе, содержащем и не содержащем ПАВ. На рис. 4 приведено сравнение профилей концентрации воды в растворе в один и тот же момент времени без ПАВ и для концентрации n -октанола 400 ppm, большей предела растворимости данного ПАВ в растворе. В этом случае при наличии ПАВ происходит существенное изменение профиля концентрации воды, которое приводит к увеличению среднего значения концентрации по толщине слоя и к росту массы абсорбируемого вещества, несмотря на снижение концентрации воды вблизи межфазной границы.

Качественная картина влияния ПАВ на изменение во времени температуры межфазной границы и средней по толщине слоя температуры в процессе абсорбции приведена на рис. 5. Можно отметить, что наличие в растворе ПАВ приводит к увеличению температуры поверхности и средней температуры слоя, при этом сокращается начальный интервал времени ($t_{0\text{ЛД}} < t_0$), на котором температура поверхности остается постоянной. Аналогичная картина приведена на рис. 6 для средней по толщине слоя концентрации абсорбируемого вещества и концентрации вблизи межфазной границы. Здесь при наличии в растворе ПАВ средняя концентрация в слое больше, чем концентрация в растворе без ПАВ, в то время как поверхностная концентрация абсорбируемого вещества в растворе с ПАВ меньше, чем концентрация в растворе без ПАВ. На рис. 7 представлена типичная зависимость, связывающая концентрацию абсорбируемого вещества и температуру в состоянии термодинамического равновесия при заданном давлении пара. Стрелкой указано направление изменения в процессе абсорбции температуры и концентрации на межфазной границе.

С помощью кино и фотосъемки при введении в раствор ПАВ в приповерхностном слое зафиксировано возникновение конвекции.

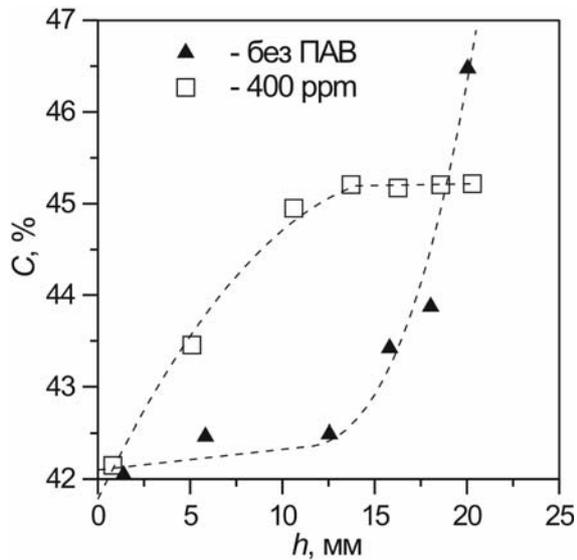


Рис. 4. Профили концентрации воды в растворе.

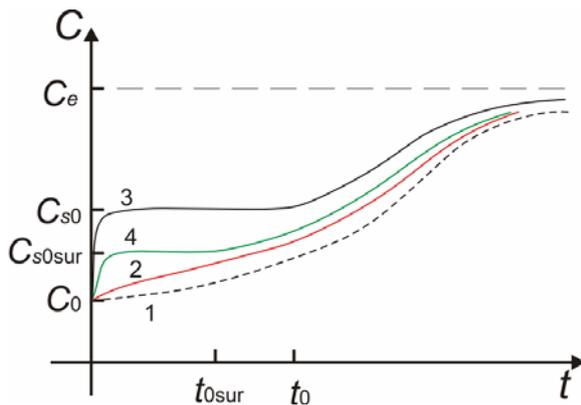


Рис. 6. Качественная картина влияния ПАВ на изменение концентрации абсорбируемого вещества вблизи поверхности и средней по слою концентрации в процессе абсорбции: 1 – средняя концентрация в слое без ПАВ, 2 – средняя концентрация в слое с ПАВ, 3 – концентрация вблизи межфазной поверхности без ПАВ, 4 – концентрация вблизи межфазной поверхности с ПАВ.

С помощью тепловизионной техники для различных моментов времени были получены термограммы перемещающейся поверхности слоя. Некоторые термограммы приведены на рис. 8. Для всех концентраций ПАВ на полученных термограммах обнаружены характерные для конвективных ячеек температурные неоднородности. На рис. 9 приведены зависимости от времени максимальных, минимальных и средних по поверхности значений температуры межфазной поверхности, которые подтверждают наличие этой неоднородности.

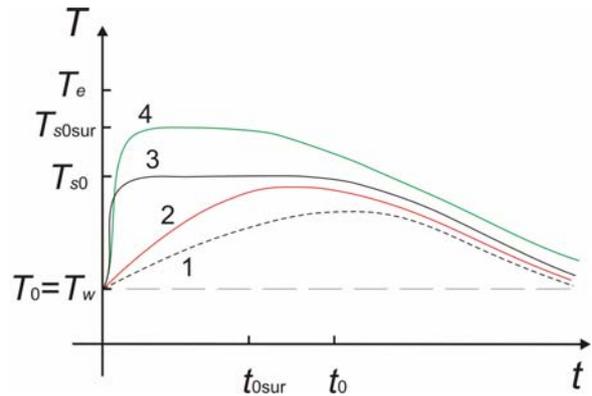


Рис. 5. Качественная картина влияния ПАВ на изменение температуры поверхности и средней по слою температуры в процессе абсорбции:

1 – средняя температура слоя без ПАВ, 2 – средняя температура слоя с ПАВ, 3 – температура межфазной поверхности без ПАВ, 4 – температура межфазной поверхности с ПАВ.

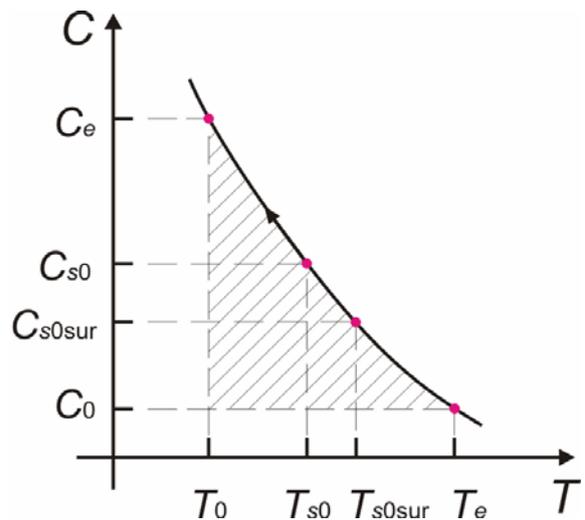


Рис. 7. Типичная зависимость концентрации абсорбируемого вещества от температуры в состоянии термодинамического равновесия.

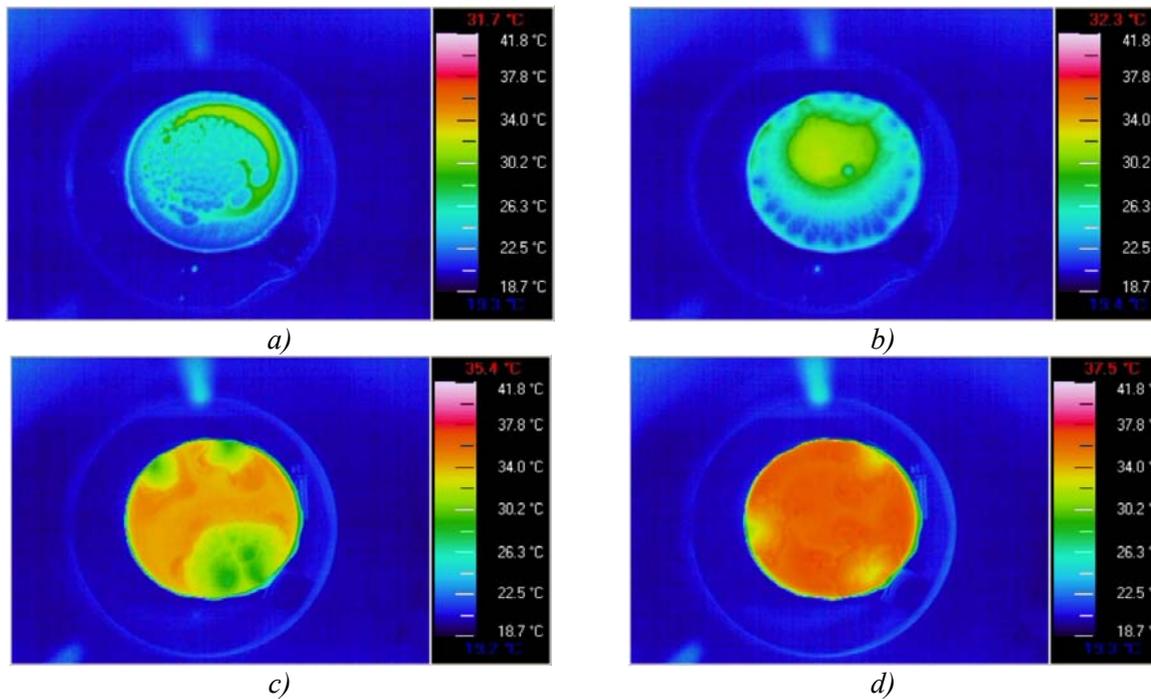


Рис. 8. Термограммы перемещающейся поверхности слоя раствора:
а) 1 с; б) 10 с; в) 60 с и д) 120 с.

Тепловизионные измерения температуры перемещающейся поверхности слоя для концентраций ПАВ, меньших предела растворимости (25-100 ppm), показали, что даже очень малые добавки ПАВ приводят к увеличению средней температуры поверхности по сравнению с температурой в отсутствие ПАВ. При этом при фиксированном давлении пара в соответствии с диаграммой термодинамического равновесия большей температуре соответствует большая концентрация соли (LiBr) на поверхности (рис. 10). Таким образом, впервые получено экспериментальное подтверждение гипотезы о «засаливании поверхности» («salting out» [3], [4]), следствием которого, предположительно, и является возникновение приповерхностной конвекции при введении в раствор добавок ПАВ, меньших предела растворимости.

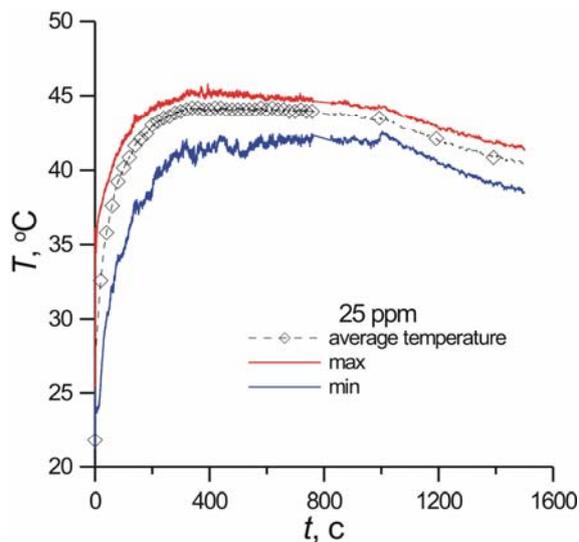


Рис. 9. Зависимость от времени максимальной, минимальной и средней температуры поверхности.

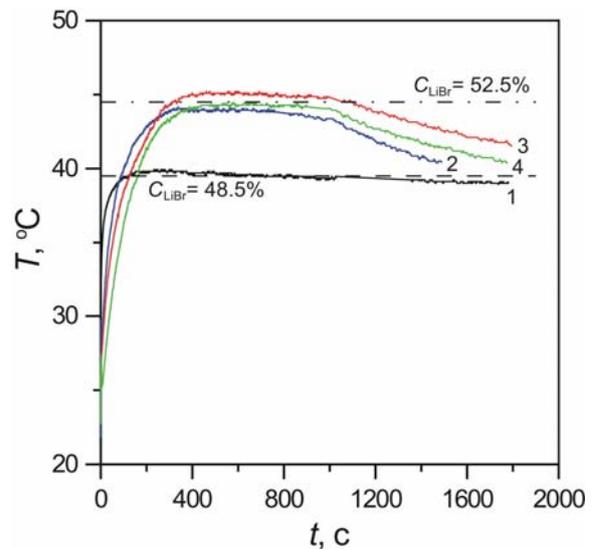
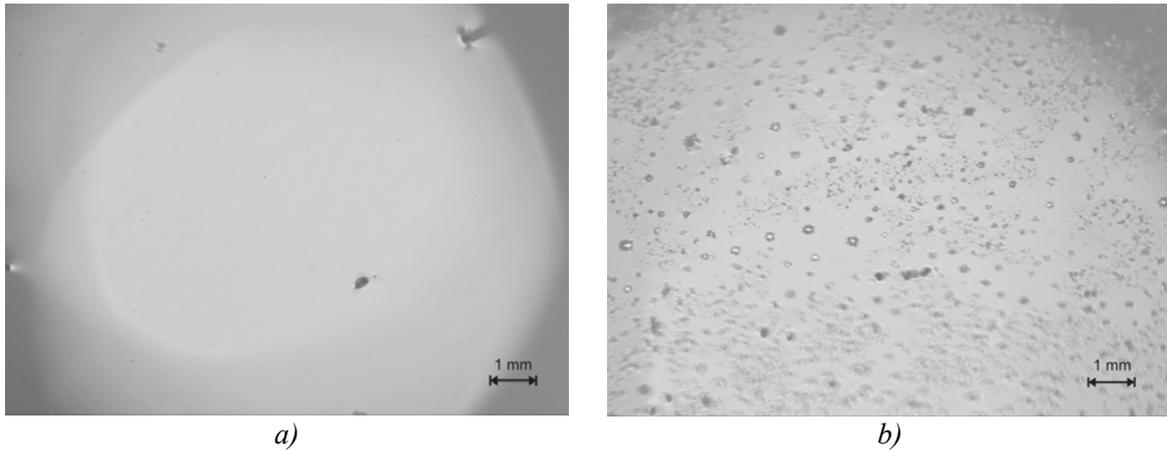


Рис. 10. Средняя температура межфазной поверхности при разных концентрациях ПАВ: 1 – без ПАВ, 2 – 25 ppm, 3 – 50 ppm, 4 – 75 ppm.

Механизмы интенсифицирующего влияния ПАВ ранее рассматривались только на уровне гипотез. Так, предполагалось [3], [6], что при концентрациях ПАВ, больших предела растворимости, возникновение приповерхностной конвекции может быть связано с появлением островков нерастворенного ПАВ, имеющих существенно меньшее поверхностное натяжение, чем окружающий их раствор. Возникающие при этом градиенты поверхностного натяжения считаются причиной конвекции (эффект Марангони).

Действительно, при концентрации *n*-октанола 400 ppm. в проведенных экспериментах такие «островки» обнаружены и зафиксированы киносъёмкой (рис. 11).



а) б)
Рис. 11. Фотографии поверхности раствора:
а) без ПАВ; б) при концентрации ПАВ 400 ppm.

4. Анализ данных о поверхностном натяжении и термодинамическом равновесии

При интерпретации полученных экспериментальных результатов, в частности, при подтверждении гипотезы «salting out», используется предположение о том, что при малых добавках ПАВ соотношение, описывающее термодинамическое равновесие межфазной границы, не меняется.

Использование такого предположения связано с полным отсутствием данных, необходимых для описания состояния термодинамического равновесия в системе: водный раствор бромистого лития с добавками ПАВ – водяной пар, содержащий добавки летучего ПАВ. При наличии в растворе и в паре ПАВ общее количество параметров и независимых переменных увеличивается и, строго говоря, должны меняться соотношения, описывающие термодинамическое равновесие этой более сложной системы. Однако в работах по влиянию ПАВ на паровую абсорбцию это не учитывается и даже не обсуждается. Термодинамическое равновесие в [3], [4], [6], [7] описывается без учета ПАВ.

В этом случае для двухфазной системы, состоящей из двухкомпонентного раствора (без ПАВ) и однокомпонентной газовой (паровой) фазы, содержащей только один из компонентов раствора, в соответствии с правилом фаз независимыми могут быть только два параметра, а при постоянном давлении пара, произвольным является только один параметр. Таким образом, концентрация раствора и температура не являются независимыми переменными. Поэтому в качестве функции, описывающей термодинамическое равновесие, используется соотношение, связывающее концентрацию одного из основных компонентов раствора (воды или бромистого лития) с температурой. При математическом моделировании обычно эта функция для простоты считается линейной. Очевидно, что отсутствие точных данных о термодинамическом равновесии рассматриваемой системы осложняет получение полного представления о механизмах интенсифицирующего влияния ПАВ.

При исследовании механизмов возникновения конвекции, при оценке степени интенсификации теплопереноса с помощью введения в раствор ПАВ, а также при физическом и математи-

ческом моделировании процессов переноса при абсорбции необходимо иметь данные о поверхностном натяжении в системе: водный раствор бромистого лития, содержащий добавки ПАВ, – чистый водяной пар (без воздуха) в условиях работы соответствующих устройств. Эти данные, в частности, необходимы для расчета градиентов межфазного натяжения и чисел Марангони, которые определяют одно из граничных условий в модели теплопереноса, а также являются определяющими при анализе устойчивости межфазной поверхности.

Поскольку поверхностное натяжение относится к свойствам межфазной поверхности, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, то при постоянном давлении пара оно может быть функцией (кроме $C_{ПАВ}$) только одной из двух переменных (C или T). Оказалось, что для условий термодинамического равновесия межфазной поверхности при постоянном давлении пара такие данные о поверхностном натяжении практически отсутствуют. Имеется ограниченное количество данных только о поверхностном натяжении раствора бромистого лития, содержащего некоторые добавки ПАВ, в системе, где газовой фазой является воздух, содержащий пары воды. Эти данные обычно приводятся как табличные или графические функции трех независимых переменных $\sigma = \sigma(C, T, C_{ПАВ})$, где каждой паре значений (C, T) по условию термодинамического равновесия должно соответствовать свое парциальное давление пара. Очевидно, что при заданном давлении пара, когда C и T не являются независимыми переменными, использовать эти данные впрямую (непосредственно) невозможно. При постоянном давлении пара необходимо преобразовать зависимость $\sigma = \sigma(C, T, C_{ПАВ})$ в $\sigma_p = \sigma_p(C, C_{ПАВ})$ или $\sigma_p = \sigma(T, C_{ПАВ})$ подстановкой в нее условия термодинамического равновесия $T = T(C)$ или $C = C(T)$ соответственно.

Анализ данных о поверхностном натяжении раствора бромистого лития, содержащего небольшие добавки 1-октанола, используемых в [6] - [8], показал, что этих табличных и графических данных недостаточно для получения аппроксимационной зависимости $\sigma = \sigma(C, T, C_{ПАВ})$ и последующего ее преобразования в $\sigma_p = \sigma_p(C, C_{ПАВ})$ или $\sigma_p = \sigma(T, C_{ПАВ})$. Кроме этого эти данные находятся в противоречии с результатами других работ. Так на рис. 12 и рис. 13 [7] представлены данные для раствора бромистого лития с добавками 1-октанола с концентрацией от 10 до 500 ppm, из которых следует, что поверхностное натяжение растет с увеличением температуры и уменьшается с ростом концентрации бромистого лития в растворе. Видно также, что зависимости поверхностного натяжения для разных концентраций ПАВ существенно различаются.

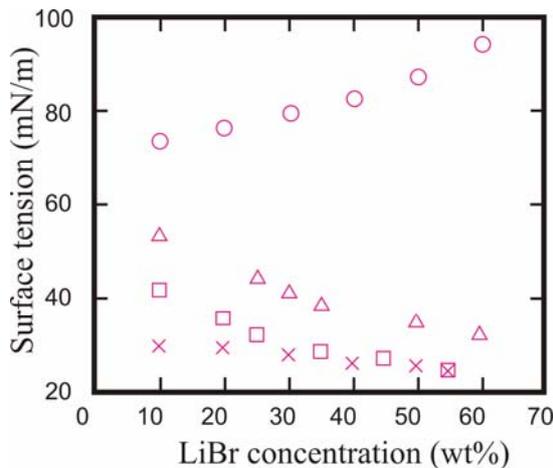


Рис. 12. Зависимость поверхностного натяжения от концентрации LiBr при 25°C с концентрацией n -октанола в качестве параметра [8]: (O) без октанола; (□) 100 ppm; (Δ) 40 ppm; (×) 500 ppm.

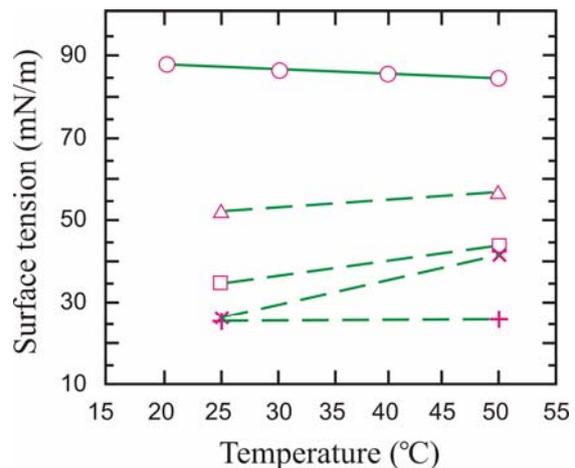


Рис. 13. Зависимость поверхностного натяжения от температуры для 50% концентрации LiBr с концентрацией n -октанола в качестве параметра [8]: (O) без октанола; (Δ) 10 ppm; (□) 40 ppm; (×) 80 ppm; (+) 400 ppm.

В то же время в работах [3], [4], [6] для определения чисел Марангони и задания граничного условия используется фиксированные отрицательные значения обеих производных $\frac{\partial \sigma}{\partial T} = -2.1 \times 10^{-4} \text{ N}/(\text{mK})$; $\frac{\partial \sigma}{\partial C^1} = -6.4 \times 10^{-4} \text{ N}/(\text{mwt.}\%)$ для любых концентраций ПАВ, меньших предела растворимости (в частности для $C_{\text{ПАВ}} = 10, 25, 65 \text{ ppm}$).

В [9] уже отмечалось, что использование в [10] - [12] для определения чисел Марангони зависимостей $\sigma = \sigma(C, T, C_{\text{ПАВ}})$ не корректно. Производные $\frac{\partial \sigma}{\partial C}$; $\frac{\partial \sigma}{\partial T}$ сами по себе не могут опре-

делять состояние межфазной поверхности, находящейся в состоянии термодинамического равновесия в системе: раствор – пар при постоянном давлении пара. Поэтому и числа Марангони, определенные в [10] - [12] пропорционально этим производным, не могут служить критериями, определяющими состояние межфазной поверхности в таких условиях. Числа Марангони в этом

случае должны определяться двумя производными $\frac{\partial \sigma_p}{\partial C}$ (или $\frac{\partial \sigma_p}{\partial T}$) и $\frac{\partial \sigma_p}{\partial C_{\text{ПАВ}}}$.

Однако производные $\frac{\partial \sigma_p}{\partial C}$ и $\frac{\partial \sigma_p}{\partial T}$ можно выразить и через $\frac{\partial \sigma}{\partial C}$ и $\frac{\partial \sigma}{\partial T}$.

$$\frac{\partial \sigma_p}{\partial C} = \frac{\partial \sigma}{\partial C} + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial C}; \quad \frac{\partial \sigma_p}{\partial T} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} + \frac{\partial \sigma}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial T};$$

Очевидно, что выполняется соотношение $\frac{\partial \sigma_p}{\partial T} = \frac{\partial \sigma_p}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial T}$; а если термодинамическое равно-

весие описывается линейной функцией $C = k_1 + k_2 T$ (k_1, k_2 определяются давлением пара),

то $\frac{\partial \sigma_p}{\partial T} = k_2 \cdot \frac{\partial \sigma_p}{\partial C}$. Определение числа Марангони пропорционально любой из производных

($\frac{\partial \sigma_p}{\partial C}$ или $\frac{\partial \sigma_p}{\partial T}$) является эквивалентным.

Выводы

Полученные экспериментальные результаты показали, что при паровой абсорбции введение в раствор поверхностно-активных добавок приводит к возникновению приповерхностной конвекции даже в первоначально неподвижном слое. Возникновение конвекции связано с температурной неоднородностью на межфазной поверхности.

Получено экспериментальное подтверждение наличия островков поверхностно активного вещества на поверхности слоя при концентрациях ПАВ, больших предела растворимости. При концентрациях, меньших предела растворимости, подтверждена гипотеза засаливания поверхности («salting out»).

Показано, что для более детального исследования механизмов интенсифицирующего влияния ПАВ на паровую абсорбцию в условиях работы теплового насоса необходимы данные о поверхностном натяжении и термодинамическом равновесии в системе: водный раствор бромистого лития с добавками ПАВ – пар, содержащий добавки летучего ПАВ. Имеющиеся данные о поверхностном натяжении раствора бромистого лития, содержащего небольшие добавки 1-октанола, полученные для системы с воздушной газовой фазой противоречивы и недостаточны для использования их при определении чисел Марангони и анализе интенсифицирующего влияния ПАВ в условиях работы абсорбера теплового насоса.

Обозначения

- C - концентрация воды в растворе (массовая доля);
- C^1 - концентрация бромистого лития в растворе;

$C_{ПAB}$ - концентрация поверхностно-активного вещества, ppm;
 P - давление, Па;
 T - температура, °С;
 σ - поверхностное натяжение, Н/м;
 Ma - число Марангони.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 06-01-00315, 06-08-08060).

Литература

- [1] Nakoryakov V.E., Grigoryeva N.I., Bufetov N.S., Dekhtyar R.A., Marchuk I.V. Vapor absorption by immobile solution layer. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2004. Vol. 47, No.6-7. pp. 1525–1533.
- [2] Накоряков В.Е., Буфетов Н.С., Григорьева Н.И., Дехтярь Р.А. Тепло- и массоперенос при абсорбции пара неподвижным слоем раствора. *Прикладная механика и техническая физика*. 2003. Т. 44, № 2. с. 111–118.
- [3] Daiguji H., Hihara E., Saito T. Mechanism of absorption enhancement by surfactant. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1997. Vol. 40, No 8. pp. 1743–1752.
- [4] Castro J., Leal L., Perez-Segarra C.D., Pozo P. Numerical study of the enhancement produced in absorption processes using surfactants. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2004. Vol. 47, No. 14-16, pp. 3463-3476.
- [5] Lowell A. McNeely Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide. *ASH-RAE Trans*. 1979. Vol. 85. pp. 413–434.
- [6] Hozawa N., Inoue M., Sato J., Imaishi T. Marangoni convection during steam absorption into aqueous LiBr solution with surfactant. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 1991. Vol. 24, No.2. pp. 209–214.
- [7] Ji W., Setterwall F. Effect of heat transfer additives on the instabilities of an adsorbing falling film. *Chemical Engineering Science*. 1995. Vol. 50, No.19. pp. 3077–3097.
- [8] Yao W., Bjurström H., Setterwall F. Surface Tension of Lithium Bromide Solutions with Heat-Transfer Additives. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 1991. Vol. 36, No.1. pp. 96–98.
- [9] Григорьева Н.И. О методах определения чисел Марангони при исследовании процесса абсорбции в условиях работы теплового насоса. *Теоретические основы химической технологии*. 2005. Т. 39, № 6. с. 595–599.
- [10] Глебов Д., Сеттеруолл Ф., Густафссон М. Оценка интенсификации массоотдачи при внесении поверхностно-активных веществ на основе нового полуэмпирического метода. *Теоретические основы химической технологии*. 2002. Т. 36, № 5. с. 481–486.
- [11] Kim K.J., Berman N.S., Wood B.D. Absorption of Water into LiBr Solutions with 2-Ethyl-1-Hexanol. *AIChE Journal*. 1996. Vol. 42, No. pp. 884–888.
- [12] Fujita I., Hihara E. Surface tension- driven instability of thin liquid film of Li Br aqueous solution absorbing water vapor. *Proceedings of the Int. Sorption Heat Pump Conf., Munich, Germany*, 1999. pp. 367–373.