

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ АБСОРБЦИИ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ГЛУБИНЕ СЛОЯ АБСОРБЕНТА

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

Представлены результаты экспериментального исследования термокапиллярной конвекции в растворе бромида лития при неизотермической абсорбции водяного пара в ограниченном сосуде при переменной глубине абсорбента. При развитии термоконцентрационной конвекции получены термограммы межфазной поверхности для различных режимных параметров как с поверхностно-активным веществом (ПАВ), так и без него. Показано, что введение в раствор ПАВ малой концентрации (25-50 ppm) приводит к интенсификации тепло- и массообмена в системе раствор бромид лития-ПАВ-водяной пар, к разрыву тонкой пленки абсорбента и образованию «сухого пятна».

Ключевые слова: абсорбция, бромид лития, поверхностно-активное вещество, тепло- и массообмен, термокапиллярная конвекция.

ВВЕДЕНИЕ

Явление физической абсорбции это поглощение пара раствором абсорбента. Для некоторых веществ, например, пары воды и раствор бромида лития, при абсорбции выделяется большое количество тепла на границе раздела фаз. Этот тепловой эффект используется в абсорбционных устройствах. В таких аппаратах процесс абсорбции осуществляется на пленках раствора, стекающих по поверхностям, через которые отводится выделившееся при абсорбции тепло. Имеется ряд теоретических работ посвященных исследованию пленочной абсорбции [1-3]. В современной энергетике, химической промышленности важной задачей является интенсификация тепло- и массопереноса, поиск новых способов увеличения производительности и снижения металлоемкости именно абсорберов, как основного элемента холодильной машины и теплового насоса.

Одним из таких способов является введение в раствор поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые приводят к возникновению приповерхностной конвекции и к интенсификации процессов переноса массы. Такие процессы применительно к системе вода-бромид лития мало изучены и исследо-

ваны, так как в экспериментах с использованием ПАВ трудно разделить вклад в тепло- и массоперенос конвективного и вынужденного течения. Наиболее удобным объектом исследования таких процессов является абсорбция пара неподвижным слоем раствора, когда вынужденное течение отсутствует [4-8].

В работе [4] показано, что в начальный период абсорбции, когда тепловой и диффузионный слои достаточно тонкие, малые градиенты концентрации и температуры приводят к возникновению движения жидкости в слое абсорбента. В работе [5] показано, что при введении в раствор ПАВ в неподвижном слое жидкости возникает интенсивное конвективное перемешивание в слое абсорбента, что приводит к интенсификации переноса теплоты и массы при абсорбции по сравнению с раствором без ПАВ [6-8].

Другим способом интенсификации процесса тепломассопереноса в современных аппаратах абсорбционного типа может быть организация регулярных и устойчивых пленок абсорбента, стекающих по различным развитым поверхностям, где толщина пленки может сильно варьироваться [9]. Более удобным объектом исследования таких процессов является абсорбция водяного пара слоем

ИССЛЕДОВАНИЕ АБСОРБЦИИ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ГЛУБИНЕ АБСОРБЕНТА

раствора переменной глубины, когда вынужденное течение отсутствует.

Цель настоящей работы – исследование влияния ПАВ, а также переменной глубины слоя абсорбента на интенсивность конвективного течения в процессе неизотермической абсорбции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1. Круглая кювета 2 диаметром 70 мм, заполненная раствором абсорбента, помещалась в вакуумную камеру 1. На дне кюветы 2 размещался семигранный брусок-призма 3 из нержавеющей стали, верхняя горизонтальная поверхность которого шириной 10 мм граничила с одной стороны с вертикальной гранью высотой 12 мм, а с другой – с гранью, расположенной относительно горизонтальной под углом 30°. Регистрация изменения температуры на поверхности раствора проводилась с помощью тепловизионной техники 5 (10 к/с) через прозрачные для инфракрасного излучения окна 4. Визуализация конвективных течений в поверхностном слое проводилась видеокамерой 6 (30 к/с) через нижнее окно 4 с использованием подсветки световым ножом 7. Генератор водяного пара 8 соединялся с абсорбером паропроводом и клапаном 9, отсекающим их друг от

друга. Экспериментальная установка была оснащена автоматизированной системой поддержания заданного давления с точностью ± 5 Па, а также системой автоматического сбора и обработки информации с помощью персонального компьютера 10. В качестве меток для визуализации возникающих в слое абсорбента конвективных потоков использовались мелкие частицы оксида железа размером порядка $0,1 \text{ мкм} \div 10 \text{ мкм}$.

Перед началом каждого эксперимента производилось удаление неабсорбируемых газовых примесей и длительное термостатирование раствора. Процесс абсорбции начинался с открытия клапана 9 и подачи водяного пара из генератора 8 в абсорбционную камеру 1. При этом синхронно начиналась запись на видеокамеру 6 со скоростью 30 к/с через боковое смотровое окно 4 абсорбционной камеры 1 возникающих конвективных движений в слое жидкости и на инфракрасную камеру 5 через верхнее специальное IR-стекло 4 поле температур межфазной поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Была проведена визуализация полей скоростей в растворе при переменной глубине абсорбента в ограниченном сосуде с помощью специально введенных в раствор меток.

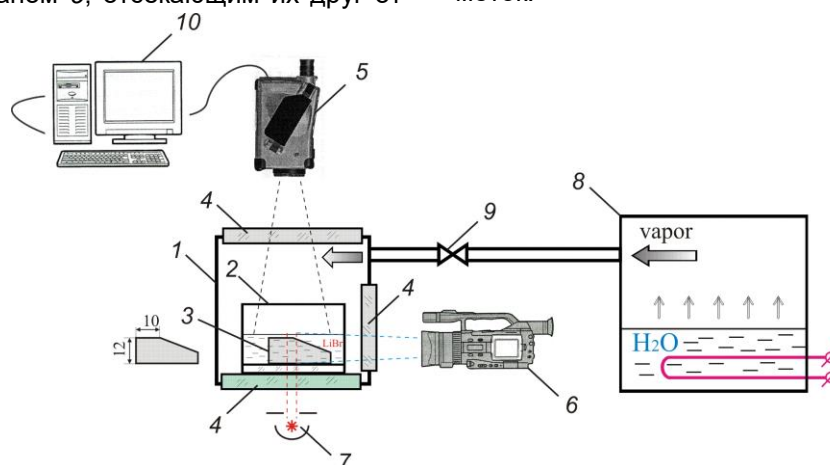


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – вакуумная камера, 2 – кювета, 3 – призма, 4 – окна, 5 – тепловизор, 6 – видеокамера, 7 – световой нож, 8 – генератор пара, 9 – клапан, 10 – персональный компьютер

Эксперименты проводились как с чистым раствором бромида лития с начальной массовой концентрацией соли в растворе $\xi = 57,8\%$, так и с раствором, в который был добавлен ПАВ – *n*-октанол концентрации 25 и 50 ppm. Высота слоя раствора изменялась с помощью призмы 3 от 1 до 14 мм. Толщина слоя раствора над верхней гранью призмы h_0 варьировалась от 1,1 до 2 мм.

Следует отметить, что в экспериментах с раствором бромида лития без добавок ПАВ устанавливалось течение жидкости над горизонтальной поверхностью призмы в сторону вертикальной грани, то есть по направлению больших градиентов температуры. На рисунке 2 приведено изменение температуры поверхности ΔT во времени между максимальной T_{\max} и минимальной T_{\min} температурами на поверхности, ограниченной прямоугольной областью, соответствующей верхней, узкой, прямоугольной грани призмы. В этом случае величина ΔT характеризует величину температурных неоднородностей на границе раздела фаз. При таком изменении ΔT (рисунок 2-а) для раствора бромида лития без добавок ПАВ можно сделать вывод о том, что в выделенной области на поверхности, для которой рассчитывалась величина ΔT , в начальный момент абсорбции существуют температурные неоднородности. Эти неоднородности связаны с различной толщиной абсорбционного слоя. И тем не менее наличие такого рода температурных неоднородностей не приводит к возникновению интенсивного конвективного движения (перемешивания) жидкости в тонком слое абсорбента над призмой. Из рисунка 2-б видно, что примерно через 200с после начала эксперимента температурная неоднородность в выделенной области достигает максимального значения. После достижения локального максимума происходит уменьшение величины ΔT разброса максимальной и минимальной температуры в рассматриваемой области.

При уменьшении начальной толщины слоя абсорбента с 2 мм до 1,1 мм над призмой в процессе абсорбции возможно образование разрывов жидкости и, как следствие,

«сухого пятна» на поверхности призмы только при введении в раствор ПАВ малой концентрации. На рисунках 3 и 4 приведены характерные кадры видеосъемки и кадры телевизионной съемки образования таких разрывов за короткий период времени (отсчет времени ведется с момента образования «сухого пятна» на поверхности призмы). Возникновение конвекции связано с температурной и концентрационной неоднородностью на межфазной поверхности слоя абсорбента. Тангенциальные силы поверхностного натяжения направлены от более холодных участков к более теплым участкам на границе раздела фаз, которые и приводят к разрыву пленки над горизонтальной гранью.

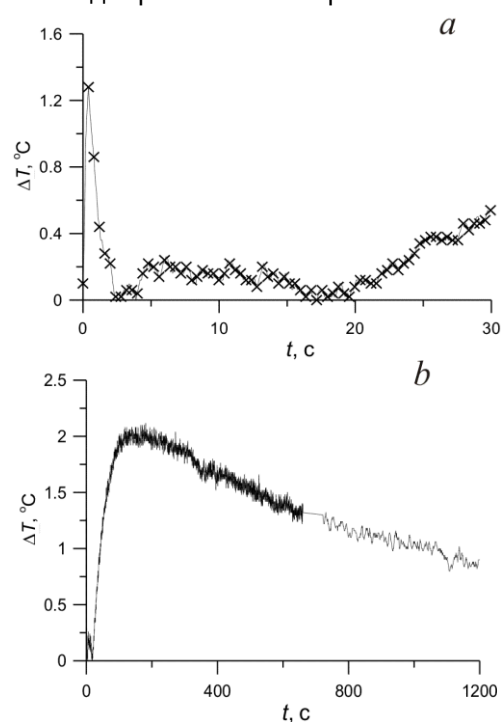


Рисунок 2 – Изменение во времени разности температур $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ на поверхности абсорбента без ПАВ в области бруска: а – начальный период; б – большие времена

На рисунке 4 хорошо видно образование «сухого» пятна над узкой гранью призмы в течении короткого периода времени. «Время жизни» такого пятна обычно составляло от нескольких секунд до $60 \div 80$ секунд, затем пятно замывалось, так как общий уровень

ИССЛЕДОВАНИЕ АБСОРБЦИИ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ГЛУБИНЕ АБСОРБЕНТА

раствора за это время повышался из-за сорбции. непрерывно продолжающегося процесса аб-

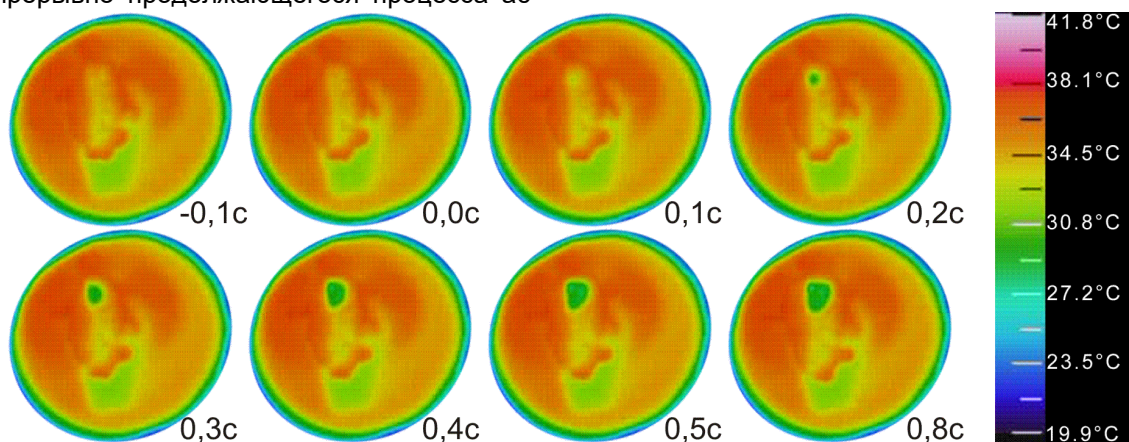


Рисунок 3 – Кадры тепловизионной съемки границы раздела фаз при абсорбции в слое абсорбента переменной глубины при концентрации ПАВ 50 ppm

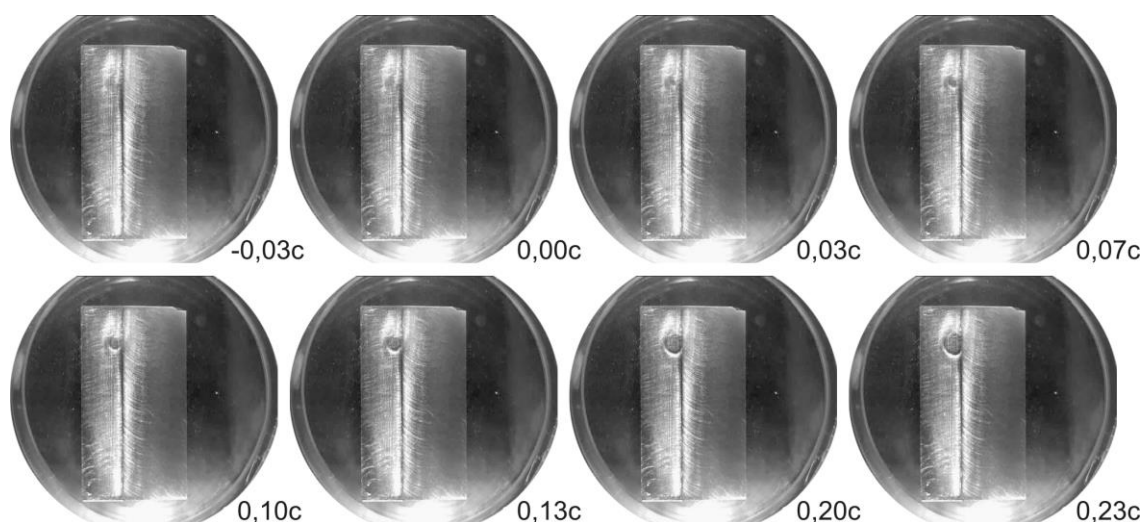


Рисунок 4 – Кадры видеосъемки границы раздела фаз при абсорбции в слое абсорбента переменной глубины

Во всех экспериментах с ПАВ наблюдалось интенсивное перемешивание жидкости около призмы; возникали как вертикальные, так и горизонтальные вихри. В вертикальных вихрях жидкость двигалась вверх вдоль вертикальной грани призмы. В горизонтальных вихрях наблюдалось разнонаправленное движение жидкости над верхней гранью призмы: как стекание, так и натекание.

Наличие разрывов пленки абсорбента свидетельствует о том, что добавка n -

октанола значительно усиливает действие сил поверхностного натяжения, которые приводят к разрыву пленки в самом неглубоком месте над призмой и образованию «сухого пятна».

С другой стороны, из-за образования «сухих пятен» уменьшается тепломассообменная поверхность, что сразу же ухудшает интегральные коэффициенты переноса тепла и массы. Поэтому наличие сухих пятен на границе раздела фаз при практическом ис-

ИССЛЕДОВАНИЕ АБСОРБЦИИ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ГЛУБИНЕ АБСОРБЕНТА

пользовании пленочной абсорбции в аппаратах абсорбционного типа является крайне нежелательным. На рисунке 5 представлено сравнение температур границы раздела фаз для раствора бромида лития без ПАВ и с добавлением ПАВ в количестве 50 ppm.

Из графиков видно, что при добавлении ПАВ стабилизация температуры на поверхности наступает через 300с с начала процесса абсорбции по сравнению с раствором без ПАВ (время стабилизации температуры – 80с). При этом T_{\min} изменяется иначе чем T_{\max} . Резкое изменение T_{\min} (падение значений температуры на несколько градусов) над узкой гранью призмы свидетельствует о разрыве пленки абсорбента в этой области и образованию «сухого пятна» на поверхности призмы.

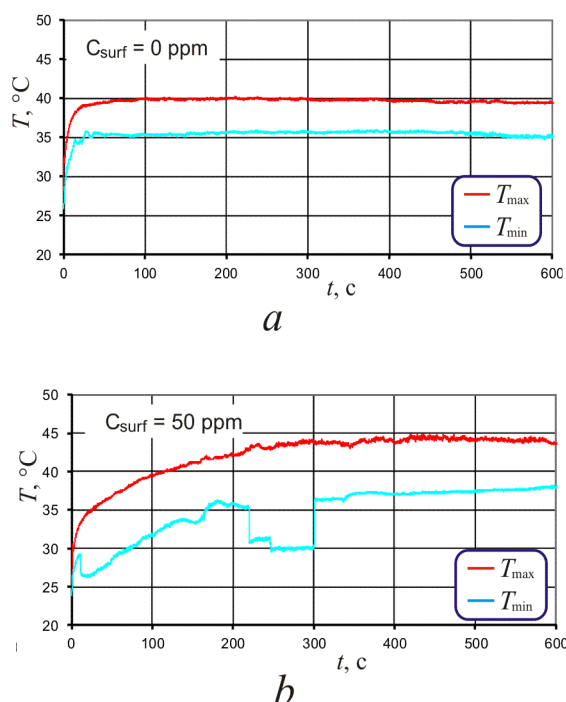


Рисунок 5 – Изменение во времени температур T_{\max} и T_{\min} на поверхности абсорбента в области бруска: а – раствор бромида лития без ПАВ; б – раствор с ПАВ, 50 ppm

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты показали, что при паровой абсорбции водяного пара раствором бромида лития в

отсутствии ПАВ, возникшая в начальный момент, термокапиллярная конвекция в дальнейшем не развивается при любой глубине абсорбента.

Присутствие ПАВ приводит к возникновению приповерхностной конвекции в слое абсорбента. Проведенные эксперименты показали, что небольшая добавка ПАВ ($25 \div 50$ ppm) приводит к существенной интенсификации теплопереноса при переменной глубине абсорбента. Вследствие высокой степени интенсивности абсорбции при минимально возможной толщине слоя возможно образование «сухих пятен» и разрыв пленки раствора над призмой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Накоряков, В.Е. Точное решение задачи о совместном теплопереносе при пленочной абсорбции / Н. И. Григорьева // Инж. физ. журнал. – 1977. – Т. 33(5). – С. 893-896.
2. Grossman, G. Simultaneous heat and mass transfer in film absorption under laminar flow// Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1983. – V. 26(3). – P. 357-371.
3. Накоряков, В. Е. Теплообмен при пленочной абсорбции с изменением объема жидкой фазы / Н. И. Григорьева // Теоретические основы химической технологии. – 1995. – Т. 29(3). – С. 242-248.
4. Daiguji, H. Mechanism of absorption enhancement by surfactant / E. Hihara, T. Saito // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1997. – 40(8). – P. 1743-1752.
5. Nakoryakov, V. E. Effect of surfactant added in small amounts on nonisothermal absorption: an experimental study / N. S. Bufetov, R. A. Dekhtyar' // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2004. – V. 45(2). – P. 276-280.
6. Nakoryakov, V. E. Heat and mass transfer at vapor absorption by an immobile layer of solution / N. S. Bufetov, N. I. Grigoryeva, R. A. Dekhtyar // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2003. – V. 44(2). – P. 111-118.
7. Nakoryakov, V. E. Vapor absorption by immobile solution layer / N. I. Grigoryeva, N. S. Bufetov, R. A. Dekhtyar, I. V. Marchuk // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2004. – V. 47 (6-7). – P. 1525-1533.
8. Буфетов, Н. С. Абсорбция газов, сопровождающаяся значительным выделением тепла / Р. А. Дехтярь // Ползуновский вестник. – 2004. – № 1. – С. 53-56.

9. Накоряков, В. Е. Теплообмен при паровой абсорбции на ряде горизонтальных труб / Н. И. Григорьева, Н. С. Буфетов, Р. А. Дехтярь // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сборник научных статей. – Киев: «НПВК Триакон», 2011. – Вып. 2(7). – С. 86-90.

Буфетов Николай Сергеевич – Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, канд. тех. наук, старший науч. сотрудник, e-mail: bufetov@itp.nsc.ru

Дехтярь Руслан Антальевич – Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, канд. тех. наук, старший науч. сотрудник, e-mail: dekhtyar@itp.nsc.ru

Накоряков Владимир Елиферьевич – Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, д. т. н., акад. РАН, e-mail: nakve@itp.nsc.ru