УДК 536.423.4

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ АБСОРБЦИИ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЕ АБСОРБЕНТА

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

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ (НШ-8888.2010.8).

АННОТАЦИЯ

Проведены эксперименты по абсорбции водяного пара неподвижным слоем водного раствора бромистого лития (LiBr) переменной толщины в круглой кювете без поверхностно-активного вещества (ПАВ) и с ПАВ разной концентрации. С этой целью выполнено моделирование изменения рельефа дна исследуемой кюветы и выявлено влияние переменной толщины слоя жидкости на возникновение движения в приповерхностном слое и возможности управления процессом тепломассопереноса.

Исследована структура течения раствора в приповерхностном слое, выполнены измерения температуры межфазной поверхности с помощью тепловизионной камеры. Для раствора, не содержащего ПАВ, выполнен также расчет сил поверхностного натяжения.

Показано, что при введении в раствор ПАВ происходит существенное изменение в структуре течения в приповерхностном слое, приводящее к разрывам пленки. Приведены результаты измерений температуры межфазной поверхности, полученные с помощью тепловизионной камеры.

ВВЕДЕНИЕ

Задача увеличения производительности абсорбционной аппаратуры продолжает оставаться актуальной для технологических процессов и устройств различных отраслей промышленности. Одним из способов интенсификации является использование малых добавок в абсорбирующие вещества. В ряду таких добавок находятся поверхностноактивные вещества (ПАВ) [1, 2], широко используемые, например, в абсорбционных тепловых насосах и холодильных установках. Однако механизм интенсифицирующего воздействия на процесс абсорбции подобных добавок до настоящего времени находятся большей частью на гипотетическом уровне, а экспериментальные исследования насчитывают очень ограниченное количество работ.

Большинство исследователей связывают улучшение массоотдачи при абсорбции растворами, содержащими ПАВ, с возникновением вблизи межфазной границы конвекции, вызванной градиентами поверхностного натяжения. Поэтому при исследовании механизмов возникновения конвекции, при оценке степени интенсификации тепломассопереноса с помощью введения в раствор ПАВ, а также при физическом и математическом моделировании процессов переноса при абсорбции необходимо иметь данные о поверхностном натяжении в системе водный раствор бромистого лития, содержащий ПАВ, - водяной пар в условиях работы соответствующих устройств. Эти данные необходимы для расчетов градиентов поверхностного натяжения и чисел Марангони, которые определяют одно из граничных условий модели тепломассопереноса, а также являются определяющими при анализе устойчивости межфазной поверхности [3].

Исследования механизма интенсифицирующего влияния ПАВ при абсорбции на стекающих пленках, каплях и струях, то есть на тех объектах, которые реально используются в практике, чрезвычайно сложны. Поэтому выявление основных механизмов влияния ПАВ

на интенсивность паровой абсорбции проводилось на упрощенном объекте: первоначально неподвижном слое абсорбента.

Другим из возможных способов интенсификации и управления процессом тепломассопереноса при абсорбции может быть рассмотрен модельный случай переменной толщины в неподвижном слое абсорбента, который соответствует в реальных промышленных аппаратах развитым поверхностям. Так, например, изменение рельефа дна исследуемой кюветы может вызывать температурные и концентрационные неоднородности на поверхности, которые приводят к появлению тангенциальных сил, действующих на поверхности, и, как следствие, к возникновению термоконцентрационной конвекции различной интенсивности.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ БЕЗ ПАВ

Для выяснения направления действия сил поверхностного натяжения были выполнены опыты по созданию искусственного перепада температур на поверхности жидкости в процессе абсорбции без ПАВ и с ПАВ.

Исследования проводились на установке (рис.1), состоящей из абсорбера 1, в который помещалась кювета 2, заполненная абсорбентом. Абсорбер имел прозрачные дно 3, верхнюю крышку и боковые смотровые окна как в видимом, так и в инфракрасном спектре. Это позволяло проводить измерения распределения температуры поверхности с помощью тепловизора7 и вести наблюдения за абсорбентом с использованием горизонтальной или вертикальной подсветки 4. Генератор водяного пара 9 соединялся с абсорбером 1 паропроводом с клапаном 5, отсекающим их друг от друга. Давление паров воды в генераторе, а во время эксперимента – в абсорбере, поддерживалось постоянным за счет регулируемого с помощью компьютера 8 подвода энергии.

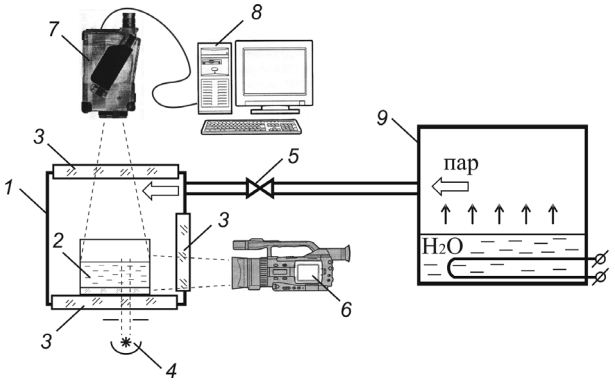

Рис.1 Схема экспериментальной установки.

Для того чтобы уменьшить влияние теплоемкости стенок кюветы, которые понижают температуру раствора LiBr вблизи них во время абсорбции, создавая температурные неоднородности, в опытах использовалась кювета с тонкими (20 мкм) и прозрачными стенками из лавсановой пленки.

На дне круглой кюветы размещался семигранный брусок изнержавеющей 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°. В основании брусок был шириной 26 мм и длиной 45 мм. Глубина абсорбента над верхней гранью бруска во всех опытах варьировалась и составляла 1÷2 мм.

Исследования проводились с 58%-м раствором бромистого лития при давлении паров воды 2,02±0,02 кПа.

В результате проведенных опытов обнаружено, что такое расположение граней способствовало созданию различных температурных градиентов на поверхности жидкости над бруском, создавая тем самым различные по величине силы поверхностного натяжения после выхода теплового слоя на поверхность бруска. Температурные неоднородности над бруском проявлялись через 10 - 20 с после начала абсорбции, которые фиксировались тепловизионной камерой, и, как следствие, наблюдалось некоторое несоответствие линий изотерм с контуром бруска. Это несоответствие связано с различием толщины слоя жидкости над бруском, а также с возникшим движением жидкости в области бруска.

На основании термограмм получены изотермические линии (рис.2), а также рассчитаны силы поверхностного натяжения, которые на рис.2 показаны стрелочками: чем длиннее стрелочки, тем больше по величине сила поверхностного натяжения. Расчет произведен

с использованием основных свойств раствора без ПАВ [4].

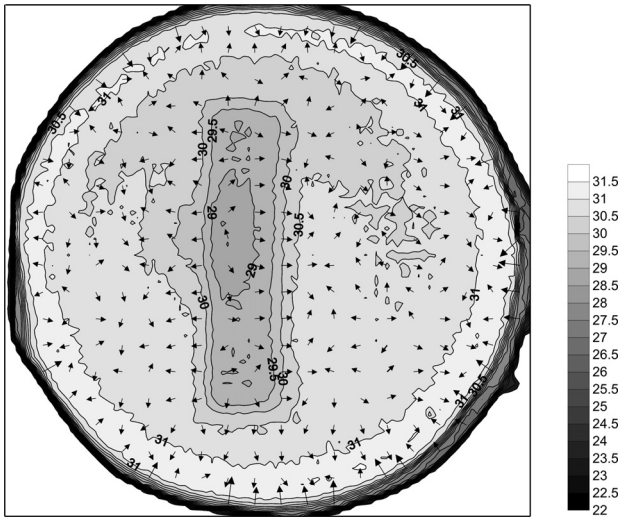

Рис.2 Поля температур и сил поверхностного натяжения.

Из рисунка видно, что со стороны вертикальной грани изотермические линии расположены друг от друга на более близком расстоянии, чем над наклонной поверхностью. Это создает со стороны вертикальной грани большие силы поверхностного натяжения, чем над наклонной гранью, то есть силы поверхностного натяжения направлены в сторону более высоких температур, то есть эти силы должны способствовать стеканию жидкости с поверхности бруска.

Действительно, с помощью видеокамеры зафиксированы треки меток в поверхностном слое, которые подтверждают вывод: стекание с горизонтальной грани бруска происходит в сторону вертикальной грани (рис.3). Возмещение потерь жидкости над бруском возможно за счет ее натекания с торцов и со стороны наклонной грани. Такое состояние наблюдалось в начальный период возникновения мелкомасштабных течений. Со временем, когда температурные градиенты на поверхности ослабевают, картина течения может измениться, но стекание жидкости с верхней грани всегда происходит в сторону вертикальной грани, по крайней мере, в ее средней части. В этой части жидкость движется на всей глубине (13 – 14 мм), что фиксируется видеокамерой: около дна в сторону бруска, затем вверх вдоль вертикальной грани и от бруска – в верхнем слое. В тех случаях, когда вблизи торцов возникает натекание на брусок, около его грани появляется два медленно вращающихся вертикально расположенных вихря: верхний – с движением жидкости на поверхности в сторону бруска, нижний – с движением около дна в ту же сторону и на границе их смыкания – от бруска.

В результате исследований было показано, что неравномерность толщины абсорбента вызывает температурные и концентрационные неоднородности на поверхности, которые приводят к появлению тангенциальных сил, действующих на поверхности, и, как следствие, к возникновению термоконцентрационной конвекции различной интенсивности в зависимости от движущей силы абсорбции.

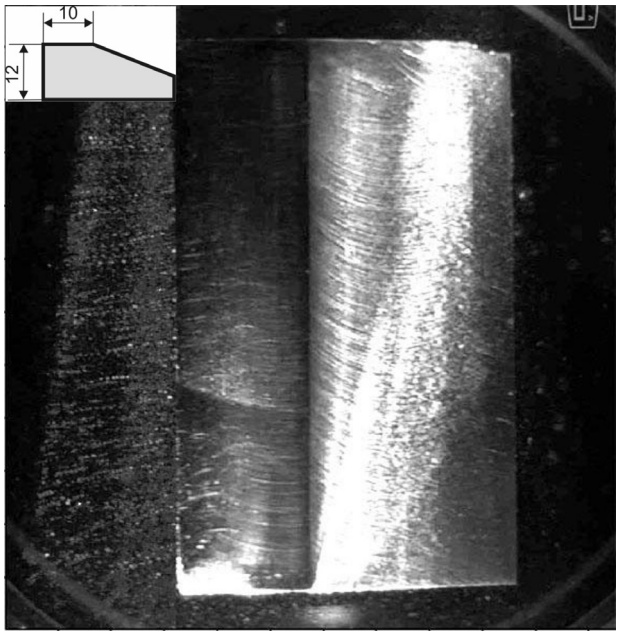

Рис.3 Треки меток в поверхностном слое.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПАВ

Исследования с ПАВ проводились на той же установке (рис.1) с 58%-м раствором бромистого лития при давлении паров воды 2,02±0,02 кПа. В качестве ПАВ использовался n-октанол, количество которого в исследуемом растворе LiBr изменялось от 25 ppm до 75 ppm:

1 - 58%-й раствор бромистого лития + 25 ppm n-октанола;

2 - 58%-й раствор бромистого лития + 50 ppm n-октанола;

3 - 58%-й раствор бромистого лития + 75 ppm n-октанола.

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

При уменьшении начальной толщины слоя до 1.2 мм над бруском в процессе абсорбции могли происходить в первые минуты эксперимента разрывы жидкости – образование сухих пятен. На рис.4 приведены фотография и ИК-кинограмма образования таких разрывов, полученная с помощью тепловизионной камеры. Кадры ИК-кинограммы представлены через 0.1с. На рисунке хорошо видно образование сухого пятна над бруском. Это является экспериментальным подтверждением того, что тангенциальные силы поверхностного натяжения направлены от более холодных участков к более теплым, которые и приводят к разрыву пленки над горизонтальной гранью.

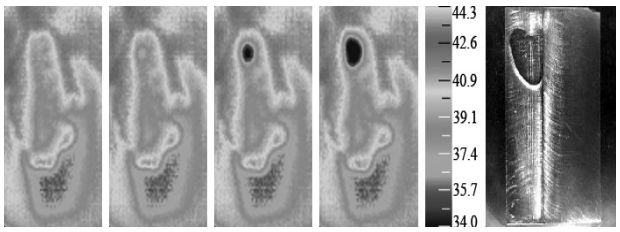

Рис.4 ИК-кинограмма и фотография образования разрыва слоя абсорбента.

На рис.5 приведены результаты изменений температуры межфазной поверхности, полученные тепловизионной камерой после обработки первичных данных полей температур межфазной поверхности: 1 – максимальная температура выделенной области круглой кюветы, 2 – средняя температура той же области и 3 – минимальная температура в круглой кювете. Из рисунка видно, что изменение минимальной температуры межфазной поверхности при образовании сухого пятна происходит скачкообразно. При замывании сухого пятна температура поверхности в дальнейшем продолжении опыта изменяется монотонно.

На основании полученных термограмм в настоящее время не представляется возможным рассчитать силы поверхностного натяжения, как это было сделано для раствора LiBr без ПАВ, так как нет достоверных данных для основных теплофизических свойств раствора LiBr, содержащего небольшие добавки n-октанола.

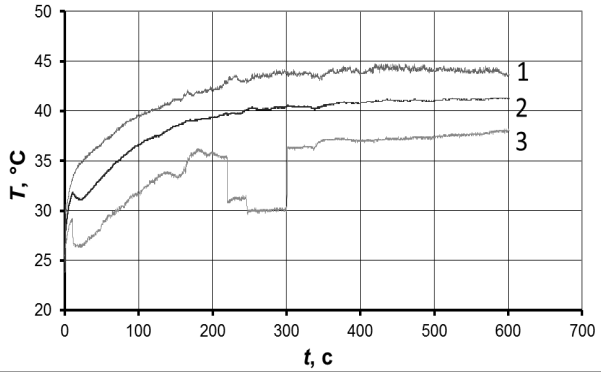

Рис.5 Изменение температуры поверхности абсорбента над бруском.

Так немногочисленные данные о поверхностном натяжении, которые 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 [2].

Следует также отметить, что в аналогичных экспериментах с раствором LiBr без добавок n-октанола устанавливалось течение жидкости с горизонтальной поверхности бруска в сторону вертикальной грани, то есть по направлению больших градиентов температуры. Разрывов тонкого слоя жидкости над бруском не наблюдалось ни в одном из экспериментов в отличии от опытов с ПАВ.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов с ПАВ получено, что малые добавки n-октанола значительно усиливают действие сил поверхностного натяжения и приводят к значительным изменениям структуры течения в неподвижном слое абсорбента переменной толщины, а также к интенсификации тепломассопереноса при неизотермической абсорбции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование тепломассопереноса при абсорбции водяного пара пленкой жидкого абсорбента переменной толщины.

Впервые с использованием тепловизионной камеры получены термограммы межфазной поверхности при абсорбции пара раствором LiBr с ПАВ и без ПАВ в круглой кювете с переменной глубиной абсорбента. Эти термограммы межфазной поверхности, в дальнейшем используются для определения концентраций, соответствующих состоянию термодинамического равновесия для раствора без ПАВ.

Экспериментально показано, что градиенты поверхностного натяжения направлены от более холодных участков к более горячим участкам межфазной поверхности, а также возникает приповерхностная конвекция в первоначально неподвижном слое. Возникновение конвекции связано с температурной неоднородностью на межфазной поверхности. Введение в раствор ПАВ в небольших концентрациях приводит к увеличению градиентов поверхностного натяжения и разрыву слоя абсорбента в самом мелком месте.

Таким образом, необходимы дальнейшие как теоретические, так и экспериментальные исследования, направленные на интенсификацию процессов тепломассопереноса при неизотермической абсорбции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Daiguji H., Hihara E., Saito T. Mechanism of absorption enhancement by surfactant // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1997. – Vol. 40, No. 8. – P. 1743-1752.
2. Nakoryakov V.E., Grigoryeva N.I., Bufetov N.S. and Dekhtyar R.A. Heat and mass transfer intensification at steam absorption by surfactant additives // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2008. – Vol. 51, No. 21-22. – P. 5175-5181.
3. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. Неизотермическая абсорбция в термотрансформаторах. – Новосибирск: Наука, 2010. – 114 с.
4. Löver H. Thermodynamischen und physikalische Eigenschaften der wässrigen Lithiumbromid Lösung. – Dissertation, Karlsruhe, 1960.