

АБСОРБЦИЯ ГАЗОВ, СОПРОВОЖДАЮЩАЯСЯ ЗНАЧИТЕЛЬНЫМ ВЫДЕЛЕНИЕМ ТЕПЛА

Н.С. Буфетов, Р.А. Дехтярь

Абсорбция пара растворами солей, сопровождающаяся выделением значительного количества тепла, широко используется в тепловых насосах и абсорбционных холодильных машинах. Чаще всего процесс абсорбции осуществляется на пленках раствора, стекающих по поверхностям, через которые отводится выделившееся при абсорбции тепло. Поэтому большинство работ посвящено исследованию именно пленочной абсорбции. Однако абсорбция пара неподвижным слоем раствора является удобным объектом для экспериментальных исследований совместного тепло- и массопереноса при выделении теплоты в тонком слое жидкости на границе раздела фаз газ-жидкость. Это обусловлено тем, что в этом случае можно последовательно учесть вклад каждого фактора, влияющего на тепло- и массоперенос: тепловыделения, перемещения межфазной границы, отвода тепла через стенку. Кроме этого в случае абсорбции неподвижным слоем жидкости можно создать условия, наиболее близкие теоретическим моделям [1-3].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования проводились на установке [4], в измерительный комплект которой входил тепловизор типа «Сова», состоящей из абсорбера и генератора пара, соединенных между собой трубопроводом с быстродействующим клапаном. В качестве абсорбента использовался водный раствор бромистого лития (LiBr), а в качестве поглощаемого газа – водяной пар. Эта система широко используется в абсорбционных тепловых насосах и холодильных машинах. Теплофизические и другие свойства ее достаточно хорошо исследованы и представлены в [5].

Абсорбер представлял собой цилиндрический сосуд диаметром 165 мм и высотой 87 мм, выполненный из нержавеющей стали, с боковым смотровым окном для визуального контроля и измерений уровня слоя, которые осуществлялись катетометром 6 с точностью менее 0,01 мм. Боковые стенки абсорбера были толщиной 1,5 мм, дно – 6 мм. Стенки абсорбера были футерованы с внутренней

стороны листовым фторопластом толщиной 5 мм для уменьшения возможного развития вдоль них конвективных потоков.

Генератором пара служил сосуд объемом около 20 л, на дне которого были размещены нагреватели для выпаривания воды из раствора LiBr. Компьютерное управление источником питания позволяло поддерживать давление в системе постоянным с точностью ± 5 Па, т.е. давало возможность использовать генератор пара в качестве баростата, что контролировалось разностным мембранным низкопределельным датчиком давления.

Пять термопар в защитных кожухах в виде капиллярных трубок диаметром 1 мм вводились через боковые стенки 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. Длина горизонтальной части термопар внутри сосуда составляла 65 мм. Нижний капилляр располагался около дна, касаясь его, а верхний – на высоте 20 мм. Концентрированный раствор LiBr заливался в абсорбер в таком количестве ($0,855 \pm 0,025$ 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 °С. При ступенчатом изменении температуры показания термопар достигали постоянных значений за время не более 3 сек.

Измерения температуры поверхности раствора бромистого лития проводились с помощью инфракрасной (ИК) камеры. Приемником излучения служил одноэлементный, охлаждаемый жидким азотом кадмий-ртуть-телуровый фотодиод. Регистрируемый диапазон ИК излучения составлял 3,5-5,5 мкм, что позволяло принимать основное излучение с глубины порядка 10 мкм. Развертка осуществлялась механически посредством двух вращающихся германиевых призм. Излучение с поверхности раствора бромистого лития проходило через окно, отражалось от поворотного зеркала и попадало в объектив ИК камеры. Прозрачным для ИК излучения окном служило

стекло, изготовленное из LiF. Сканер мог работать в двух режимах сканирования. В обычном режиме осуществлялась покадровое сканирование со скоростью 1 кадр за 1,2 секунды. Время между кадрами 1,91 секунды. Размер кадра был 192x192 элемента. Во втором режиме сканирование производилось без кадровой развертки, кадровая призма не вращалась. Фактически измерялась температура поверхности раствора вдоль заданной линии. Время сканирования одной строки 0,0061 секунды. Таким образом, частота измерений температуры во втором режиме составляла 164 Гц. Для калибровки прибора в поле зрения ИК камеры помещались два эталонных излучателя с различной температурой. 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 термопарами. Величина измеренного на фотодиоде сигнала пересчитывалась в значение температуры с использованием формулы Планка для излучения абсолютно черного тела согласно температуре эталонных излучателей. Коэффициенты излучения эталонных излучателей и поверхности раствора бромистого лития полагались одинаковыми. Погрешность измерений оценивалась как $\pm 0,25^\circ\text{C}$.

Для измерения теплового потока в дно абсорбера были заделаны дифференциальные термопары на расстояниях 0,5 и 5 мм от донной поверхности.

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 послыном сливе.

До начала эксперимента абсорбер укрывался специальным колпаком из полиэтиленовой пленки и все пространство под ним термостатировалось. Для этого там размещались электронагреватель с вентилятором и датчиком температуры, управление которыми осуществлялось с помощью компьютера. Вентилятор осуществлял постоянную циркуляцию воздуха под колпаком, а нагре-

ватель поддерживал температуру окружающего абсорбер воздуха в заданных пределах. Длительное термостатирование в течении не менее 12 часов обеспечивало перед началом эксперимента постоянную температуру в слое и отсутствие конвективных потоков в жидкости.

Дно термостатировалось потоком охлаждающей воды, поступающей из водяного термостата в специальную кювету.

Для удаления возможно скапливающихся в результате десорбции с металлических, резиновых и других поверхностей абсорбера и генератора неабсорбируемых примесей производилось вакуумирование через капиллярную трубку диаметром $d = 1$ мм, которое продолжалось в течение всего эксперимента.

После открытия клапана на трубопроводе, соединяющего абсорбер и генератор, водяной пар поступал в абсорбер, и через 0,8 секунд обычно происходило выравнивание давлений.

В процессе эксперимента проводились измерения температуры на различных расстояниях от дна, в том числе и на межфазной поверхности, а также контроль давления и перепада температуры в днище абсорбера. Сбор этой информации осуществлялся компьютером. Уровень слоя измерялся катетометром 6 с погрешностью 0,01 мм.

Эксперимент заканчивался закрытием клапана подачи пара в абсорбер, прекращением откачки газа и впуском атмосферного воздуха. Далее проводился послынный слив раствора и определялись средняя плотность и температура каждой пробы и всего раствора. Концентрация восстанавливалась по ее табличным зависимостям от плотности и температуры [28] с использованием сплайновой интерполяции.

Для получения данных об изменении профиля концентрации от времени был проведен цикл из 12 экспериментов, воспроизводящих все начальные и текущие условия и отличающихся по продолжительности (от 15 минут до 20,5 часов).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Параметры эксперимента: давление $P = 1970$ Па, начальная температура раствора $T_0 = 20,4^\circ\text{C}$, начальная концентрация воды в растворе $C_0 = 0,45$, температура воды, охлаждающей дно $T_w = 20,4^\circ\text{C}$.

На рисунках 1а и 1б приведены результаты измерения температуры в зависимости от времени на различных уровнях в слое абсорбента и на его поверхности в сравне-

нии с расчетами (сплошные линии), проведенными в соответствии с результатами решений, полученных в [1, 3]

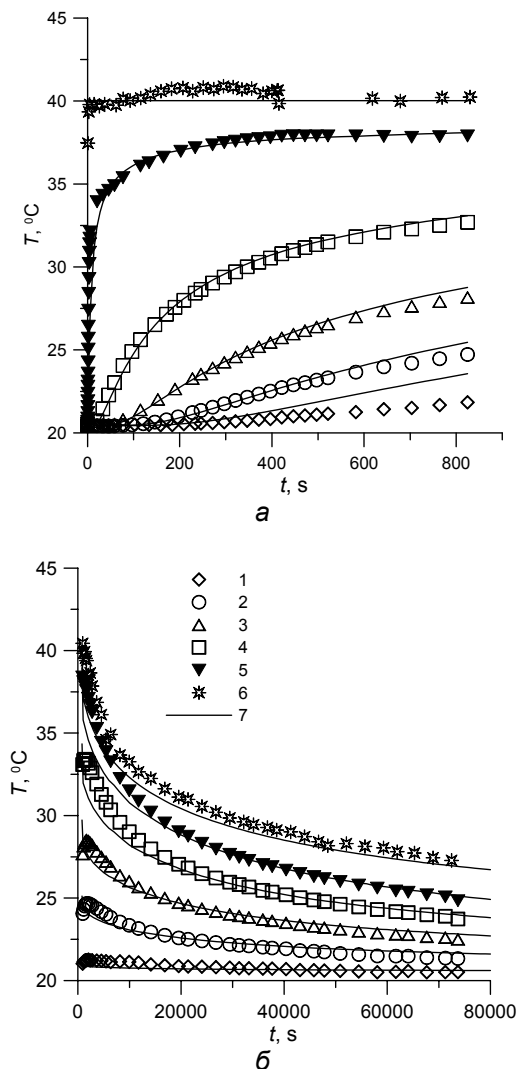


Рис. 1. Изменение температуры в слое жидкости: 1 – $h = 0.5$ мм, 2 – 5 мм, 3 – 10 мм, 4 – 15 мм, 5 – 20 мм, 6 – поверхность, 7 – расчёт

Приведенные экспериментальные результаты подтверждают основные теоретические положения моделей и в частности, показано, что при постоянном давлении на некотором начальном интервале времени температура поверхности слоя практически не меняется. Затем температура на межфазной границе падает, а профиль температуры внутри слоя действительно приближается к линейному.

Отдельно более подробно в эксперименте был исследован начальный период роста и стабилизации давления в абсорбере. Измерения давления в это время про-

водились с частотой 1 кГц, измерения температуры поверхности с частотой 164 Гц, т.е. тепловизор использовался в режиме измерения температуры только вдоль заданной линии. При расчете температуры поверхности в режиме изменяющегося давления использовалось решение, полученное на малых временах, причем каждому значению давления соответствовала своя квадратичная зависимость равновесных значений $C_W = f(T_W)$ на межфазной границе. Результаты этих измерений и сопоставления с расчетом приведены на рис. 2, из которого видно, что температура поверхности растет вместе с давлением, но расчетные значения T_W несколько больше измеренных. Это различие сохраняется на коротком промежутке времени, и с выходом давления в абсорбере на постоянное значение температура межфазной поверхности слоя T_W также становится постоянной и практически совпадает с рассчитанной.

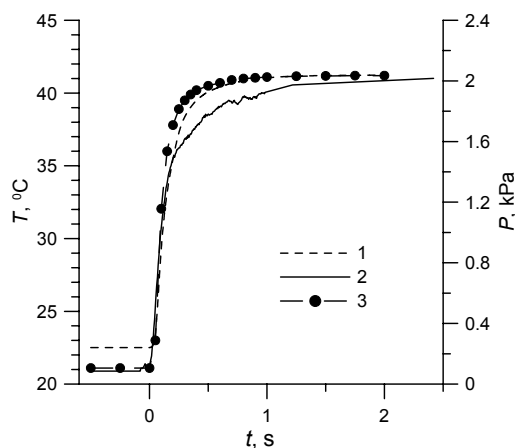


Рис. 2. Изменение температуры поверхности и давления в начальный момент времени: 1 – давление; 2 – измеренная температура; 3 – рассчитанная температура

На рис. 3 приведены профили концентрации в разные времена процесса абсорбции, причем измеренное среднее значение концентрации каждого слоя соответствуют его средней координате. Концентрация на поверхности слоя определялась по измеренной тепловизором поверхностной температуре в соответствии с условием равновесия. Наблюдается изменение со временем профиля концентрации от более вогнутого к менее вогнутому при постоянном росте содержания абсорбируемого вещества в каждом слое.

Изменение толщины слоя и массы абсорбируемого вещества со временем показано на рис. 4 и 5.

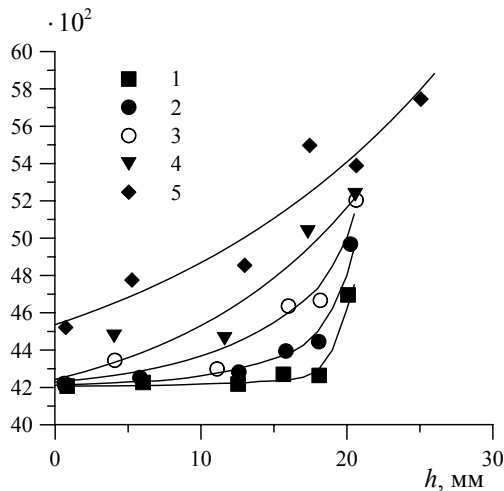


Рис. 3. Профили концентрации в различные моменты времени: 1 – $t = 980$ сек, 2 – $t = 3670$, 3 – $t = 7465$, 4 – $t = 18\,230$, 5 – $t = 56\,250$; линии – осреднение экспериментальных зависимостей

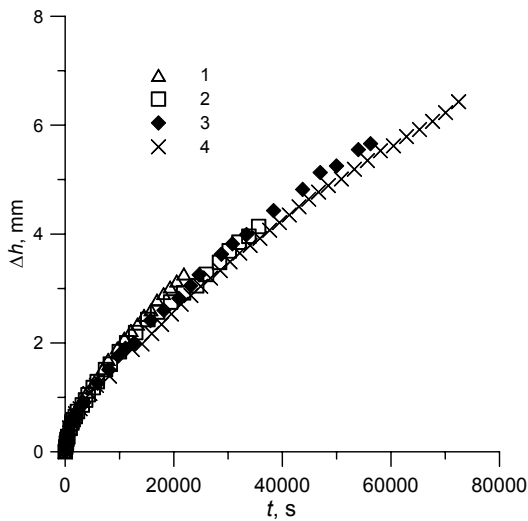


Рис. 4. Изменение толщины слоя: 1, 2, 3, 4 – экспериментальные данные

Расчетные значения прироста массы на 15-20 % меньше измеренных, что можно объяснить как несовершенством модели (особенно при больших значениях t) и недостаточной точностью измерений, так и возможным несоответствием условий проведения эксперимента и предположений, положенных в основу модели.

Приведенные результаты демонстрируют хорошее соответствие экспериментальных данных и расчетов, выполненных на основе моделей [1] и [3] взаимосвязанного теплопереноса при абсорбции непод-

вижным слоем раствора. Это дает основание для использования простых моделей в качестве предельных или эталонных при анализе как численных, так и экспериментальных результатов, полученных в более сложных физических условиях.

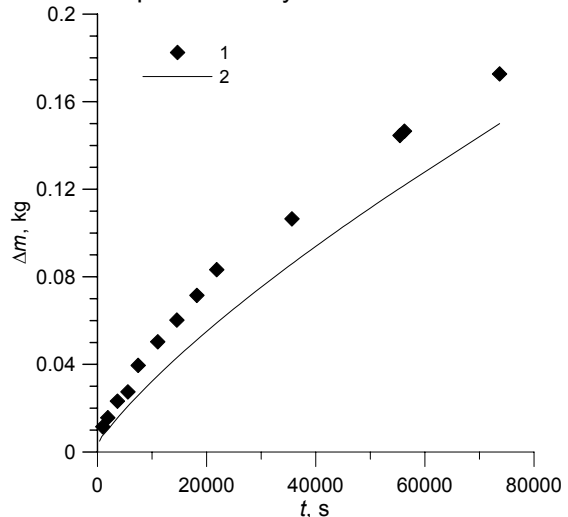


Рис. 5. Изменение массы абсорбируемого вещества от времени: точки – экспериментальные данные; линия – результаты расчетов

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 03-02-16393), в рамках гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ (грант № НШ-523.2003.1) и интеграционного проекта СО РАН № 133.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chang S.H. and Toor H.L. Gas absorption accompanied by a large heat effect and volume change of the liquid phase // *AIChEJ.* 1964. V. 10. № 3. - P. 398-402.
2. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. Точное решение задачи о совместном теплопереносе при пленочной абсорбции // *ИФЖ.* 1977. Т. 33. № 5. - С. 893-896.
3. Nakoryakov V.E. and Grigorieva N.I. Vapor absorption stagnant layer of solution // *Journal of Engineering Thermophysics.* 2002. V.11. № 1. - P.115-127.
4. Накоряков В.Е., Буфетов Н.С., Григорьева Н.И., Дехтярь Р.А. Теплоперенос при абсорбции пара неподвижным слоем раствора // *Прикл. Механ. Тех. Физика.* 2003. Т. 44, № 2. - С. 101-108.
5. H. Löver, Thermodynamischen und physikalische Eigenschaften der wässrigen Lithiumbromid Lösung, Dissertation, Karlsruhe, 1960.