УДК 536.423.4

ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ ПАРОВОЙ АБСОРБЦИИ НА РЯДЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ

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

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

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства России для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах № 11.G34.31.0035

АННОТАЦИЯ

Проведены эксперименты по абсорбции водяного пара пленкой водного раствора бромистого лития (LiBr), стекающего по вертикальному ряду десяти горизонтальных труб. Исследована структура течения раствора по трубам и в межтрубном пространстве, выполнены измерения средней температуры и концентрации раствора, температуры охлаждающей воды по глубине пакета труб, а также температуры свободной поверхности пленки. Приведены результаты расчета локальных характеристик тепломассопереноса для вертикального ряда, состоящего из десяти горизонтальных труб, с различной подачей охлаждающей воды. Получено хорошее соответствие экспериментальных результатов по температуре и концентрации раствора с расчетами по модели.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы моделированию процессов совместного тепломассопереноса при плёночной абсорбции в системах с большим тепловыделением стало уделяться все больше внимания, о чем свидетельствует обзор [1].

Абсорберы наиболее распространенных тепловых насосов состоят из вертикальных рядов горизонтальных труб, охлаждаемых движущейся внутри них жидкостью. Математические модели неизотермической абсорбции в общей постановке учитывают существенные отличия процесса абсорбции от конденсации: диффузию абсорбируемого вещества в растворе и изменение равновесных значений температуры и концентрации на поверхности пленки, подчиненных условиям межфазного равновесия. Процессы переноса тепла и массы в пленке раствора в этом случае взаимосвязаны и описываются системой уравнений теплопроводности и диффузии с соответствующими условиями на входе, на стенке и сопряженными условиями на межфазной границе [2, 3].

В экспериментальных работах последних лет приводятся либо данные об эволюции стекания пленок по трубам, полученные с помощью скоростной кинокамеры, либо результаты измерения интегральных характеристик тепломассопереноса на выходе из абсорбера. Конечно, такие исследования структуры течения абсорбента по рядам горизонтальных труб в абсорбере важны и необходимы, особенно для создания равномерно стекающей пленки. Но данных по локальным характеристикам (температура и концентрация на каждой трубе пакета) и тем более данных о температуре перемещающейся межфазной поверхности в настоящее время пока нет.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разработанная методика расчета процессов тепломассопереноса на пакетах труб базируется на моделях взаимосвязанного тепломассопереноса при абсорбции на тонкой пленке, стекающей по поверхности каждой трубы и в межтрубном пространстве, подробно изложенная в монографии [3].

Математическая постановка задачи позволила выделить систему определяющих критериев, которая кроме обычных для конденсации кри-

териев Прандтля и Рейнольдса содержит еще число Льюиса, а также аналог критерия фазового превращения *Ka*, характеризующий тепловыделение при абсорбции и отклонение от термодинамического равновесия поступающего на вход раствора.

Рассматривались две предельные модели тепломассопереноса при абсорбции на пакетах труб. Одна модель учитывает абсорбцию последовательно на каждой трубе пакета с использованием автомодельных решений отдельно на начальном участке и участке с линейным профилем температуры и не учитывает абсорбцию в межтрубном пространстве. Вторая модель предполагает конвективное охлаждение на трубах (без абсорбции) и абсорбцию только в межтрубном пространстве с быстрым достижением термодинамического равновесия раствор - пар. Сравнение с имеющимися экспериментальными данными показало, что значения концентрации абсорбируемого вещества после каждой трубы пакета ближе к рассчитанным по первой модели. Поэтому в дальнейшем используется первая модель.

Для случая абсорбции при стекании раствора по охлаждаемой поверхности существуют два характерных участка: начальный участок формирования тепловых слоев от стенки и от поверхности пленки и следующий за ним вниз по течению участок с линейным по толщине пленки профилем температуры. Причем из решения следует, что в пределах начального участка равновесные значения температуры и концентрации на поверхности пленки постоянны, а вне начального участка меняются вдоль пленки, оставаясь на линии равновесия [2]. Кроме того, на обоих участках изменение концентрации происходит внутри тонкого слоя вблизи поверхности пленки (т.к. число Льюиса Le= D/a << 1). Также следует отметить, что выбор профиля скорости течения в пленке (параболический или ударный) слабо влияет на характер решений.

Полученные решения используются для расчета характеристик тепломассопереноса при абсорбции на одиночной трубе, а также на пакете труб, в предположении, что на каждой трубе имеет место начальный участок и участок с линейным профилем температуры. Оценки показывают, что длина начального участка может составлять от одной трети до половины полупериметра трубы, что необходимо учитывать в практических расчетах. Для пакета труб расчет ведется последовательно, начиная с верхней трубы с переходом на нижерасположенную с начальными параметрами (T_0, C_0), рассчитанными как средние по толщине пленки на выходе с вышерасположенной трубы. Реальные абсорберы, как правило, являются многоходовыми, то есть охлаждающая вода внутри труб проходит последовательно через несколько труб, образующих вертикально расположенный пакет, причем наиболее эффективной считается подача охлаждающей воды с нижерасположенных труб пакета в вышерасположенные. В этом случае температура охлаждающей воды внутри труб, а, следовательно, и температура стенки на каждой трубе определяются процессами переноса, как на вышерасположенных трубах, так и на нижерасположенных трубах пакета. На рисунке 1 приведены результаты расчета характеристик тепломассопереноса при абсорбции водяного пара раствором LiBr для одного вертикального ряда, состоящего из десяти горизонтальных труб (параметры соответствуют условиям экспериментов: охлаждающая вода подается в нижнюю трубу, после прохождения через которую, поступает в вышерасположенную трубу). Начальные данные и основные параметры трех вариантов эксперимента (для давления P= 1 кПа) приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

№	C_0	T_0(°C)	$T_{вх}$ (°C)	Q_{LiBr} (м^3/час)	ρ_0 (кг/м^3)
1	0.4277	29.6	26.4	0.1205	1658
2	0.4276	29.4	26.4	0.0905	1658
3	0.4276	29.2	26.4	0.0703	1659

Таблица 2.

Q_{H20} (кг/с)	Re	C_{10}	$T_{вых}$(°C)	T_{10}(°C)
0.11	30.24	0.4322	28.0	33.4
0.11	22.71	0.4345	28.0	33.4
0.11	17.56	0.4370	28.0	33.4

На рисунке 1 линия 1 с точками соответствуют первому варианту, линия 2 с точками – второму, а линия 3 с точками – третьему. Можно обратить внимание на то, как отличается плотность потока тепла через стенку трубы (линии 1-3) и на межфазной поверхности (линии 4-6). Это кардинальное различие подтверждает существенное отличие процесса абсорбции от пленочной конденсации (при конденсации плотности потока тепла на стенке и на поверхности пленки одинаковы).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенная методика позволяет вычислить характеристики тепломассопереноса локально на каждой трубе пакета (температуру и концентрацию раствора, плотности тепловых потоков на стенке и на поверхности пленки, плотность потока массы на границе раздела фаз и т.д.). Это дает возможность поиска оптимальных параметров при проектировании абсорберов тепловых насосов и холодильных машин.

Экспериментальные исследования по абсорбции на горизонтальном ряде труб проводились на установке, состоящей из абсорбера, генератора пара, двух теплообменников, циркуляционного насоса, бака верхнего уровня и расходомерного участка. В качестве абсорбента использовался водный раствор бромистого лития (LiBr), а в качестве поглощаемого газа – водяной пар, генерируемый с помощью электрических нагревателей расположенных в нижней части абсорбера. Абсорбер представлял собой сосуд высотой 520 мм, длиной 300 мм и шириной 100 мм, выполненный из нержавеющей стали, с большим боковым смотровым окном с одной стороны и с боковыми германиевыми окнами диаметром 70 мм, расположенными с противоположной стороны. Внутри абсорбера помещались десять тонкостенных труб из нержавеющей стали диаметром 16 мм и длиной 270 мм, расположенных в вертикальной плоскости с относительным шагом s/d = 1.5, а также щелевой ороситель, выполненный из нержавеющей стали диаметром 18 мм.

Концентрированный раствор LiBr заливался в абсорбер. Затем вся система вакуумировалась с помощью вакуумого насоса 2НВР-5Д. Эксперимент начинался с включения циркуляционного насоса и нагревателей. Концентрированный теплый раствор с помощью циркуляционного насоса проходил через теплообменники, охлаждался и подавался в бак верхнего уровня. Первый теплообменник служил для быстрого охлаждения тёплого раствора и отвода тепла с помощью системы оборотного водоснабжения. Второй теплообменник – для плавного регулирования температуры раствора на входе в ороситель. Для этого в систему охлаждения теплообменника помещался электромагнитный клапан, регулирующий расход охлаждающей жидкости протекающей через второй теплообменник. Из бака верхнего уровня раствор поступал через расходомерный участок с двух сторон в ороситель, а излишки – на вход циркуляционного насоса через байпасную линию. Далее раствор стекал по пакету трубок. Для отвода тепла, выделяющегося при абсорбции, трубки охлаждались водой постоянной температуры, поступающей снизу вверх. При этом температуру охлаждающей воды до и после трубок, а также температуру раствора на входе в ороситель определяли с помощью медь-константановых термопар с точностью 0.1°С.

В ходе всего эксперимента поддерживались постоянными следующие параметры: давление в абсорбере, температура охлаждающей воды, температура и концентрация раствора на входе в ороситель. В результате проведенных экспериментальных исследований были получены следующие данные: изменение концентрации раствора после десяти трубок горизонтального ряда; температура пленки в месте отбора проб; температура поверхности пленки на трубках и в межтрубном пространстве, измеренные с помощью современной тепловизионной техники.

Отбор проб осуществлялся с помощью специальных пробоотборников. Исследуемый раствор поступал в специальное устройство, в котором производилось определение его показателя преломления, сравнивались показатели преломления на входе в абсорбер и в месте отбора пробы, затем по полученным данным и температуре восстанавливалось изменение концентрации раствора по отношению к начальному значению. При использовании этого устройства раствор не выводился из системы, а точность измерений составляла ±0.02%.

На рисунке 1 приведено сравнение экспериментальных данных по температуре и концентрации раствора, а также температуре охлаждающей воды с расчетами (залитые значки относятся к экспериментальным данным), где N – номер трубы; T (°C) – средняя температура раствора; C – средняя концентрация раствора; Q [Вт/(м^{2}К)] – плотность теплового потока; T_b (°C) – температура охлаждающей воды на входе в трубы и на выходе из труб. Получено удовлетворительное согласие экспериментальных результатов по температуре и концентрации раствора на одном ряде трубок с расчетами.

На рисунке 2 представлена фотография одного из режимов течения, на которой хорошо видны волновые структуры на поверхности стекающей пленки абсорбента и отмечается струйно-капельное течение в межтрубном пространстве.

На рисунке 3 приведена впервые полученная термограмма межфазной поверхности в процессе абсорбции при стекании раствора по трубкам и в межтрубном пространстве одновременно с изменением температуры поверхности пленки по линии АВ вдоль одной из трубки пакета. Максимальные значения температуры на поверхности трубы соответствуют минимальным толщинам пленки раствора.

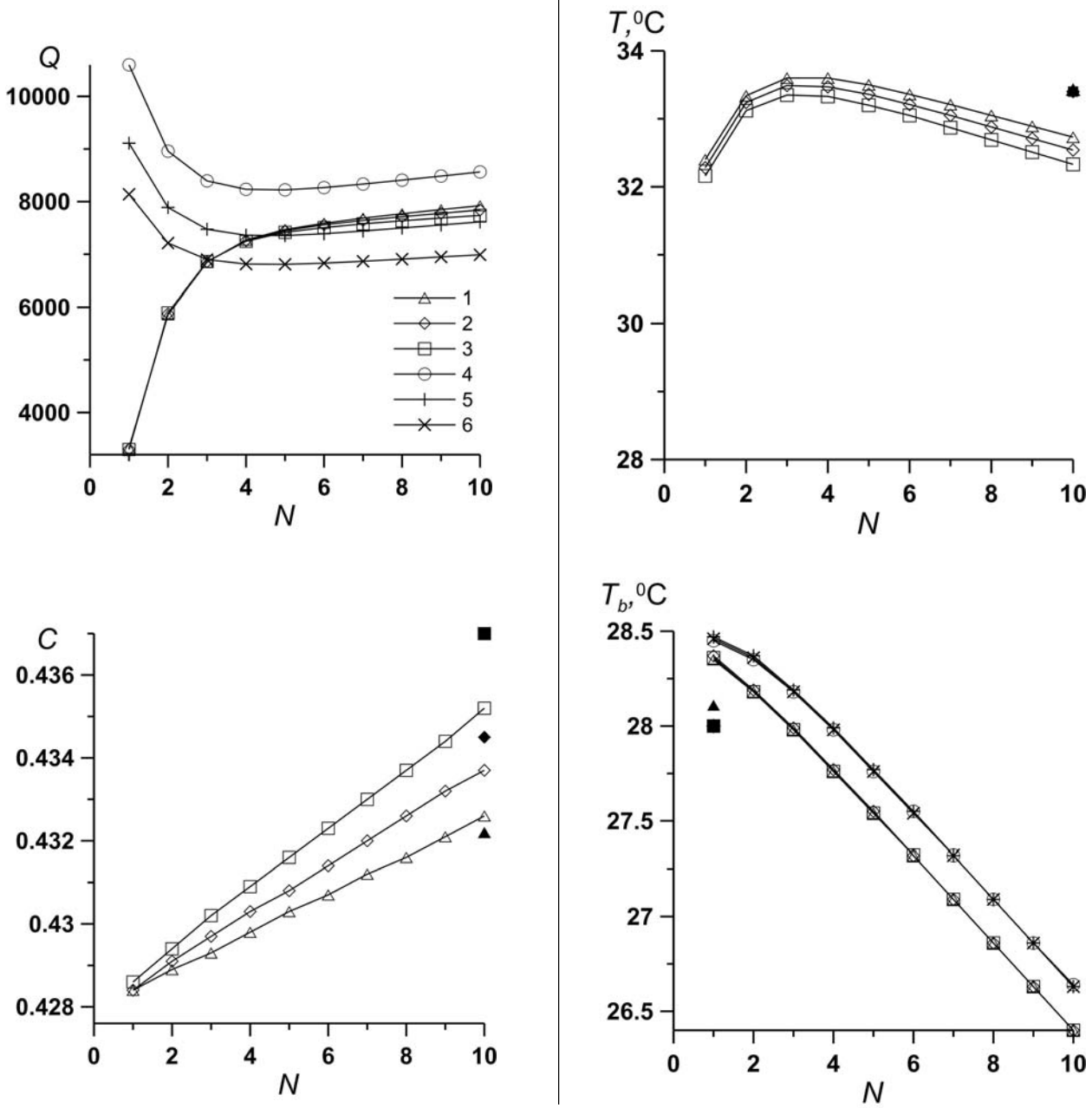

Рис.1 Характеристики тепломассопереноса при абсорбции на ряде горизонтальных труб.

Рис.2 Структура течения

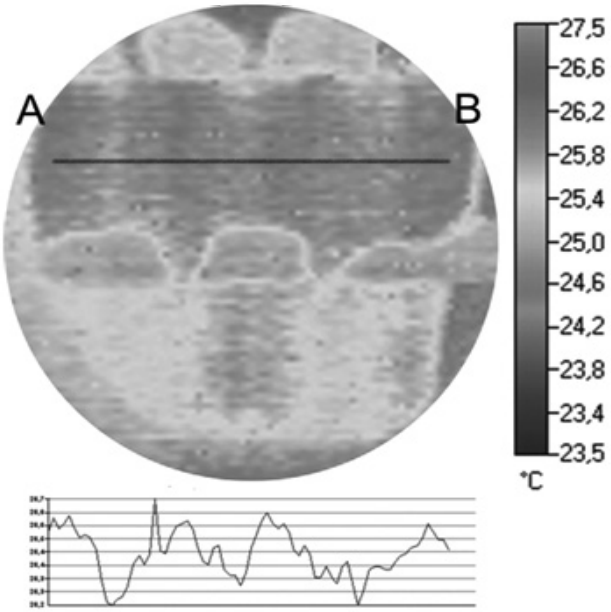

Рис.3 Термограмма межфазной поверхности и изменение температуры вдоль трубы (линия АВ)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование тепломассопереноса при абсорбции водяного пара пленкой жидкого абсорбента, стекающего по ряду горизонтальных труб. При теоретическом исследовании в качестве базовой использовалась модель взаимосвязанного тепломассопереноса при неизотермический пленочной абсорбции, разработанная в работах В.Е. Накорякова и Н.И. Григорьевой. Эта модель учитывает диффузию в жидкой фазе, тепловыделение и состояние термодинамического равновесия на межфазной границе. Впервые по этой модели выполнен расчет локальных характеристик тепломассопереноса при абсорбции растворами для объекта, существующего в реальном абсорбере (ряд труб). Получено удовлетворительное согласие расчетов по модели с экспериментальными данными по температуре и концентрации раствора на одном ряде труб.

Впервые с использованием тепловизора получены термограммы межфазной поверхности при абсорбции пара раствором, стекающим по трубам, а также в межтрубном пространстве одновременно с изменением температуры поверхности пленки вдоль трубы. Эти термограммы межфазной поверхности, в дальнейшем используются, в частности, для определения концентраций, соответствующих состоянию термодинамического равновесия.

Таким образом, необходимы дальнейшие как теоритические, так и экспериментальные исследования процессов абсорбции на рядах горизонтальных труб для реальных абсорбционных аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Killion J.D., Garimella S. A critical review of models of coupled heat and mass transfer in fallig film absorption // Int. J. Refrageration. – 2001. – Vol. 24. – P. 755 – 797.
2. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. Точное решение задачи о совместном тепломассопереносе при плёночной абсорбции // ИФЖ. – 1977. – Т. 33. – №5. – С. 893-896.
3. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. Неизотермическая абсорбция в термотрансформаторах. – Новосибирск: «Наука», 2010 – 116 С.