

УДК 66.015.23; 66.015.24

Исследование процесса истечения перегретого пара бинарного состава в жидкость

© Д.С. Белоусов, Е.В. Янчуковская

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Аннотация. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью получения степенной зависимости для скорости массообмена в паровой фазе при одиночном истечении перегретого пара бинарного состава в слой недогретой жидкости. С этой целью проведено исследование процессов переноса тепла и вещества на границе раздела паровой и жидкой фаз. Представлены описание лабораторной установки и методика проведения эксперимента. Составлена математическая модель процесса. Для оценки параметров на границе раздела использовано соотношение между коэффициентами скорости переноса тепла и вещества. Определены значение температуры границы раздела со стороны пара и граничные концентрации. Рассчитаны величины энтальпийных проводимостей и проводимостей массы в паровой и жидкой фазах для системы метанол-изопропанол. Показаны графические зависимости указанных величин от температуры границы раздела, общего потока вещества, скорости пара, симплекса геометрического подобия. Выполнено сравнение значений коэффициентов массоотдачи и проводимостей, проанализирован диапазон их изменений. Подтверждён вывод о сосредоточенности сопротивления переносу в паровой фазе. Предложена корреляционная зависимость для расчёта коэффициента скорости переноса вещества в паровой фазе систем метанол-изопропанол и изопропанол-вода. Приведены результаты статистической обработки данного критерияльного уравнения.

Ключевые слова: перегретый пар, бинарный состав, недогретая жидкость, температура границы раздела со стороны пара, коэффициенты массоотдачи, проводимости тепла и вещества, поток вещества, средний диаметр струи, корреляционная зависимость

Study of Superheated Steam Outflow of Binary Composition into Liquid

© Dmitry S. Belousov, Elena V. Yanchukovskaya

*Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation*

Abstract. The relevance of the article is due to the need to obtain power-law dependence for the rate of mass transfer in the vapor phase with a single outflow of superheated vapor of binary composition into a layer of subcooled liquid. For this purpose, a study of the processes of heat and matter transfer at the interface of the vapor and liquid phases is carried out. The article presents a description of the laboratory setup and the method of conducting the experiment. A mathematical model of the process is compiled. To estimate the parameters at the interface, the ratio between the coefficients of the heat transfer rate and the substance is used. The value of the vapor interface temperature and the boundary concentrations are determined. The values of the enthalpy conductivities and mass conductivities in the vapor and liquid phases for the methanol-isopropanol system are calculated. The graphical dependences of these values on the interface temperature, the total flow of matter, the vapor velocity, and the geometric similarity simplex are shown. The values of the mass transfer coefficients and the conductivity are compared, and the range of their changes is analyzed. The conclusion about the concentration of the transport resistance in the vapor phase is confirmed. Correlation dependence is proposed for calculating the coefficient of the substance transfer rate in the vapor phase of the methanol-isopropanol and isopropanol-water systems. The article presents the results of statistical processing of this criterion equation.

Keywords: superheated steam, binary composition, underheated liquid, vapor interface temperature, mass transfer coefficients, heat and substance conductivity, substance flow, average jet diameter, correlation dependence

Процессы тепло- и массообмена между потоками пара и жидкости, как правило, протекают совместно. Их взаимосвязь используют для объяснения механизма яв-

лений, происходящих у поверхности раздела фаз [1, 2, 3].

С целью анализа процессов переноса тепла и вещества на границе раздела была выполнена серия опытов по одиночному ис-

течению перегретого пара бинарного состава в слое недогретой жидкости.

Лабораторная установка состояла из кюветы, напорной ёмкости, датчика расхода, испарителя и приёмника конденсата. Испаритель – медная трубка, помещённая в песок, нагреваемый нихромовой спиралью. Поступающая жидкость полностью испарялась, и образовавшиеся перегретые пары подводились к соплу. Автоматическое регулирование и контроль над температурой пара, выходящего из сопла, осуществляли термопарой ТХК с потенциометром. Температуру жидкости в кювете поддерживал электронагреватель с электроконтактным термометром, работающим совместно с терморегулятором. Для выравнивания концентраций и температуры по всему объёму в кювете была установлена мешалка.

Проходя через слой раствора, пар попадал в колокол-колпак, обогреваемый циркулирующим маслом. Из верхней части колпака пар по трубке, обмотанной электронагревателем и термоизолированным асбестом, отводился в приёмник конденсата. С целью полной и быстрой конденсации пара приёмник помещали в сосуд Дьюара, наполненный охлаждающей смесью из сухого льда и ацетона.

Измерив количество пара, поступающего в слой жидкости G_H , и количество пара, выходящего из слоя G_K , вычислили общий поток вещества, переходящего из фазы в фазу N , а учёт концентраций пара на входе y_H и выходе из слоя y_K позволил рассчитать поток низкокипящего компонента N_{HK} . Поверхность контакта между паром и жидкостью F определяли обработкой фотографий. С помощью этих величин нашли потоки всего вещества N'' и низкокипящего компонента N''_{HK} , пересекающие границу раздела, отнесённые к единице поверхности, а также состав переносимого вещества y_T [4].

Знание концентраций и температур жидкости и пара позволило найти их энтальпии. Тепловые потоки на стороне пара рассчитывали из тех соображений, что доля конденсирующегося пара должна охладиться от начальной температуры T_{G_H} до температуры границы раздела T_S . Если выбрать за уровень отсчёта температуру границы, можно определить поток тепла на стороне пара. Потоки тепла на стороне жидкости отличаются от потоков тепла на стороне пара на величину теплоты фазового превращения переносимого вещества.

Трудности расчёта состояли в том, что температура границы раздела изменяется вдоль поверхности контакта. Однако вследствие того, что температура и концентрация жидкости в кювете остаются неизменными, можно найти такое значение температуры границы раздела со стороны пара T_S , для которой разность $(T_S - T_F)$ будет эквивалентна средней разности температур на стороне жидкости (здесь T_F – температура поверхности контакта). Тогда средний перепад температур и концентраций между паром и границей раздела определится как разность между общей движущей силой процесса и движущей силой его в жидкой фазе.

Уже в работе [5], подробно рассматривающей процессы совместного переноса вещества и энергии, вместо коэффициента массоотдачи β в бинарных смесях использовался параметр g – проводимость.

Энтальпийные проводимости в паровой и жидкой фазах g_{hy}^* и g_{hx}^* близки по физическому смыслу к коэффициентам теплоотдачи α . Более сложной является взаимосвязь между коэффициентами массоотдачи β и их аналогами – проводимостями массы в паровой g_y^* и в жидкой фазах g_x^* . Индекс (*) указывает на бесконечно малые потоки, пересекающие границу раздела.

Однако существуют условия, при которых разница между проводимостями массы и коэффициентами массоотдачи становится незначительной, это наблюдается в случае эквимолярного перехода вещества из фазы в фазу.

Процессы, протекающие в ректификационных колоннах, близки к адиабатическим и вследствие достаточной близости мольной теплоты испарения разных компонентов приближаются к эквимолярным. Состав переносимого вещества при адиабатическом процессе взаимодействия пара и жидкости, находящихся на линии насыщения, определяют как

$$y_T = \frac{1}{1 - \frac{r_{HK}}{r_{BK}}}, \quad (1)$$

где r_{HK} – скрытая теплота испарения низкокипящего компонента, кДж/кмоль;

r_{BK} – скрытая теплота испарения высококипящего компонента, кДж/кмоль.

В тех случаях, когда фазы сильно удалены от состояния насыщения, состав переносимого вещества может принимать разные значения и расхождения между ки-

нетическими коэффициентами g_y и β_y могут оказаться очень большими. Поэтому при сопоставлении между собой моделей массообмена следует отдать предпочтение той, которая выражает скорость переноса вещества через поверхность раздела в виде двух вкладов, обусловленных диффузионным механизмом переноса и механизмом объёмного течения, и использует в качестве кинетических коэффициентов проводимости [6]. Это особенно важно для случаев, когда взаимодействующие фазы удалены от состояния насыщения и роль переноса за счёт объёмного течения велика [7].

Для оценки параметров, характеризующих состояние на границе раздела, использовали теоретически найденное и частично подтверждённое экспериментально соотношение между коэффициентами скорости переноса вещества и тепла [8]:

$$g_y/g_{hy} = Lu_n^n, \quad (2)$$

где g_y – проводимость массы в паровой фазе, кмоль/(м²·сек);

g_{hy} – энтальпийная проводимость в паровой

фазе, кмоль/(м²·сек);

Lu_n – критерий Льюиса для пара;

n – показатель степени.

Так как критерий Льюиса для пара близок к единице, соотношение (2) превращается в равенство:

$$g_y \approx g_{hy} \quad (3)$$

Исходной предпосылкой при оценке фазовых сопротивлений было допущение подвижного равновесия на границе раздела. Данное допущение принимается многими исследователями при анализе совместно протекающих процессов тепло- и массообмена между паром и жидкостью [9].

Задача заключалась в нахождении такой температуры границы раздела, а следовательно, и таких граничных концентраций, при которых выполнялось бы условие (3). Температура границы раздела T_S подбиралась для каждого опыта методом последовательных приближений на ЭВМ.

На рисунке 1 показано изменение значений проводимостей в паровой фазе g_y^* и g_{hy}^* в зависимости от T_S для опыта, условия которого представлены в таблице 1.

Таблица 1. Измеренные и рассчитанные параметры процесса истечения пара в слой недогретой жидкости (система метанол – изопропанол)

$G_n \cdot 10^4$, кмоль/сек	$G_k \cdot 10^4$, кмоль/сек	$h \cdot 10^3$, м	$F \cdot 10^4$, м ²	$d \cdot 10^3$, м	W , м/сек	u_n , М.Д.	u_k , М.Д.	u_T , М.Д.
0,00088	0,00085	7,0	0,634	2,88	0,38	0,83	0,448	11,84
T_S , °С	N'' , кмоль/м ² ·сек	β_y , кмоль/м ² ·сек	β_x , кмоль/м ² ·сек	g_y^* , кмоль/м ² ·сек	g_{hy}^* , кмоль/м ² ·сек	g_x^* , кмоль/м ² ·сек	g_{hx}^* , кмоль/м ² ·сек	n
76,45	-0,00005	0,03192	0,00401	0,0040	0,0036	0,00392	0,00797	0,278

Видно, что при $T_S=76,45$ проводимости g_y^* и g_{hy}^* становятся равными. Найденная таким образом температура и соответствующие ей концентрации принимались в дальнейших расчётах в качестве параметров границы раздела.

На рисунке 2 для того же опыта показано изменение проводимостей g_x^* и g_{hx}^* в жидкости.

И эти проводимости изменяются вследствие изменения движущих сил процесса. Причём энтальпийная проводимость g_{hx}^* во всём диапазоне изменения T_S больше соответствующей проводимости массы g_y^* . Это указывает на то, что скорость переноса

тепла в жидкой фазе больше, чем скорость переноса массы. Данный вывод хорошо согласуется с многочисленными исследованиями процессов тепло- и массопереноса в жидкости.

Располагая сведениями о проводимостях тепла и вещества в жидкости, воспользовавшись соотношением (2), вычислили показатель степени n при критерии $Lu_{ж}$. Изменение показателя n для рассматриваемого примера в зависимости от принимаемой температуры границы раздела T_S показано на рисунке 3.

При $T_S=76,45$ показатель степени $n=0,278$.

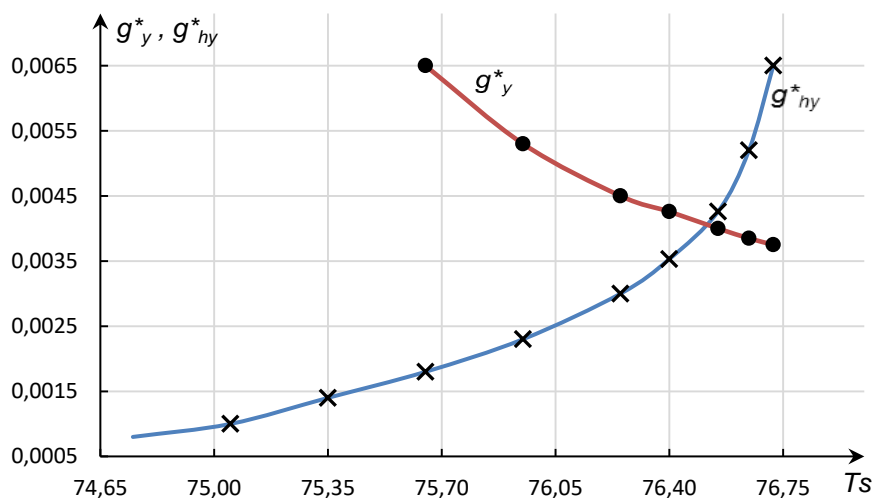


Рис. 1. Изменение проводимостей g_y^* и g_{hy}^* в зависимости от принятой температуры границы раздела

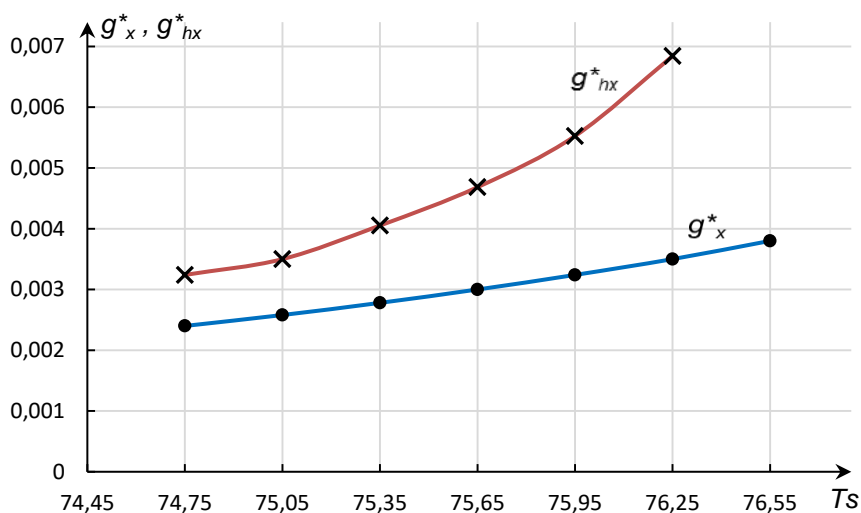


Рис. 2. Изменение проводимостей g_x^* и g_{hx}^* в зависимости от принятой температуры границы раздела

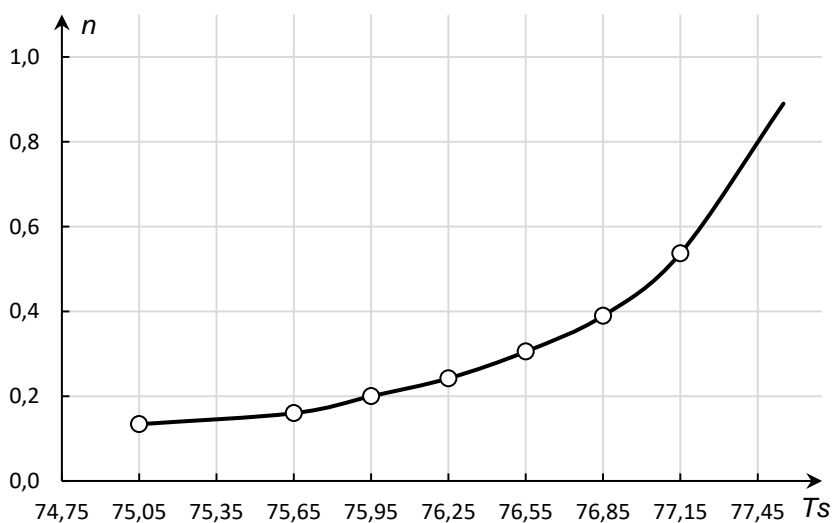


Рис. 3. Изменение показателя степени при $Lu_{ж}$ в зависимости от принятой температуры границы раздела

В таблице 2 представлены результаты вычислений проводимостей тепла и вещества в паре и жидкости, коэффициентов

массоотдачи, показателя степени при критерии $Lu_{ж}$.

Таблица 2. Результаты вычислений проводимостей и коэффициентов массоотдачи при одиночном истечении пара в жидкость (система метанол – изопропанол)

№ п/п	$T_{G_{н}}, °C$	$T_F, °C$	$T_S, °C$	N'' , кмоль/ ($m^2 \cdot сек$)	$g_y = g_{hy}^*$	g_x^*	g_{hx}^*	β_y	β_x	n
1	85,0	71,6	77,9	-0,00046	0,00187	0,00901	0,01607	0,05087	0,01119	0,23
2	85,0	73,7	76,45	-0,00005	0,00405	0,00392	0,00797	0,03192	0,00401	0,28
3	85,0	73,9	78,3	-0,00133	0,00261	0,02855	0,07780	0,10425	0,03589	0,40
4	85,0	73,9	77,55	-0,00026	0,00227	0,00824	0,0279	0,0452	0,00923	0,44
5	77,0	73,2	75,9	-0,00161	0,00238	0,05669	0,16667	0,14743	0,08263	0,42
6	77,0	73,2	75,9	-0,00116	0,00217	0,0474	0,11110	0,11953	0,06720	0,33
7	77,0	73,2	75,75	-0,00054	0,00176	0,02322	0,05567	0,07080	0,03185	0,34
8	72,7	72,3	74,75	-0,00046	0,0023	0,02643	0,04354	0,09076	0,03558	0,19
9	80,5	73,6	75,95	-0,00246	0,00639	0,12396	0,2897	0,27308	0,15738	0,33
10	80,5	73,6	76,05	-0,00269	0,00502	0,12537	0,29060	0,25514	0,16709	0,32
11	77,1	72,4	76,0	-0,00423	0,00540	0,12665	0,31451	0,32265	0,17589	0,35
12	77,3	72,8	76,05	-0,00260	0,00427	0,10366	0,18835	0,23004	0,14085	0,23
13	77,4	72,85	75,95	-0,00323	0,00431	0,10885	0,20510	0,24383	0,15169	0,25
14	77,8	72,85	75,75	-0,00227	0,00365	0,07733	0,21824	0,21080	0,11077	0,40
15	85,0	74,45	77,75	-0,00150	0,00366	0,05201	0,09992	0,051105	0,02533	0,26
16	85,0	74,5	77,95	-0,00151	0,00405	0,05393	0,09673	0,04605	0,02244	0,23

При сопоставлении между собой полученных значений проводимостей g_y^* и g_x^* легко заметить, что в некоторых опытах эти коэффициенты соизмеримы друг с другом, в других – сильно различаются. Можно предположить, что при определённых условиях сопротивление массообмену в жидкости соизмеримо с сопротивлением в паровой фазе. Однако во всех опытах осуществлялось равномерное перемешивание жидкости мешалкой с одинаковым числом оборотов. Ре-

жимы движения её в кювете во всех опытах были приблизительно одинаковыми, следовательно, коэффициенты скорости переноса должны мало изменяться от опыта к опыту.

В процессе анализа данных таблицы 2 можно установить большую зависимость проводимостей g_x^* и g_{hx}^* в жидкости от общего потока вещества N'' , пересекающего границу раздела. На рисунках 4 и 5 представлены зависимости этих коэффициентов от потока.

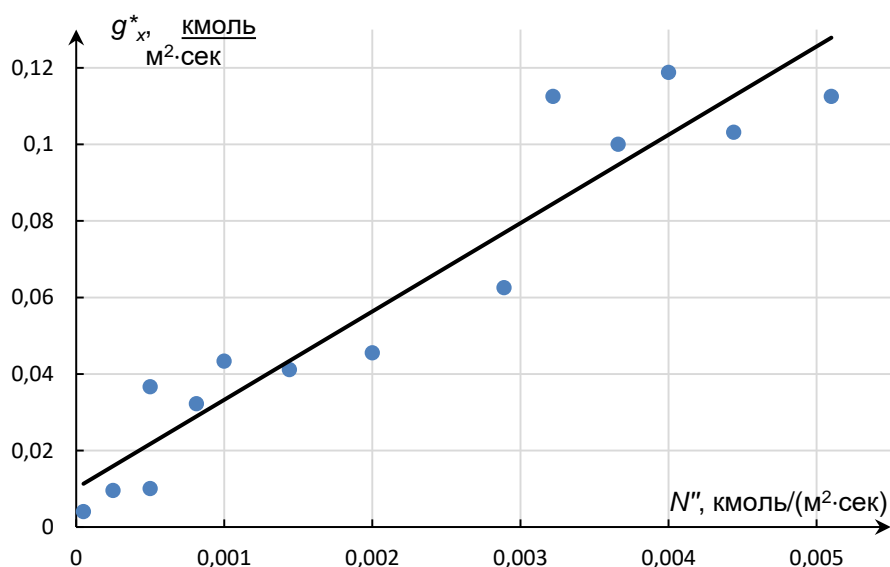


Рис. 4. Зависимость g_x^* от общего потока вещества

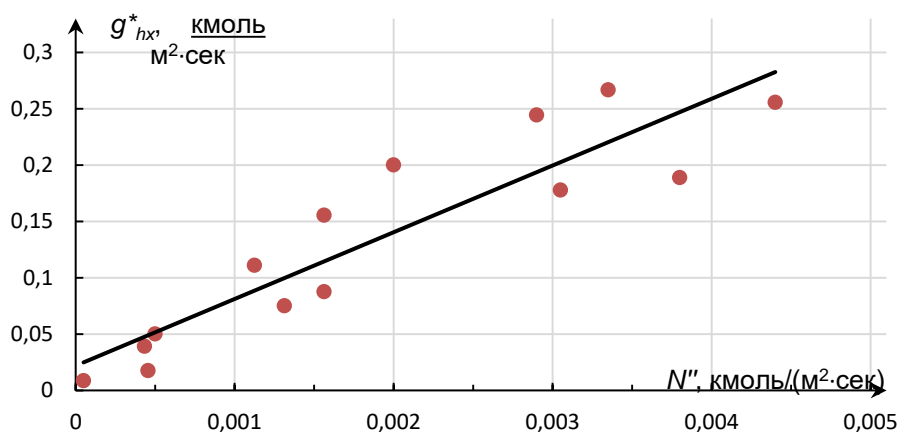


Рис. 5. Зависимость g_{hx}^* от общего потока вещества

Видно, что обе проводимости возрастают прямо пропорционально количеству вещества, переходящего из фазы в фазу.

В то же время коэффициенты скорости переноса в паровой фазе почти не зависят от массопотока N'' и определяются главным образом режимом движения пара. Единственным объяснением наблюдаемых зависимостей является то, что перенос тепла и вещества полностью определяется скоростью обмена в паровой фазе.

Перепады концентраций и температур между границей раздела и ядром жидкой фазы, наблюдаемые в эксперименте, были в состоянии обеспечить отвод гораздо больших количеств тепла и вещества, если бы этот процесс не сдерживался переносом в паре. Вывод о том, что сопротивление полностью сосредоточено в паровой фазе, был получен при исследовании конденсации пара индивидуального вещества в слое недогретой жидкости [10]. К такому же заключению пришли авторы работ [11, 12], вычисляя частные коэффициенты массоотдачи на основе аддитивности фазовых сопротивлений.

При сравнении значений коэффициента массоотдачи β_y и проводимости g_y^* видно, что диапазон изменения g_y^* гораздо меньше, чем диапазон изменения β_y . В то время как g_y^* изменялась примерно в 3,5 раза, коэффициент массоотдачи изменялся более чем в 10 раз.

Последующая обработка результатов показала, что коэффициенты g_y^* коррелируются лучше, чем β_y . Это можно объяснить тем, что на величину β_y оказывал влияние процесс конденсации пара на границе раздела, вызванный теплообменом и не связанный с диффузионным механизмом массопереноса.

Анализируя полученные результаты, установили, что коэффициенты g_y^* зависят от скорости пара W , высоты слоя жидкости h и среднего диаметра струи d .

На рисунке 6 представлена зависимость g_y^* от скорости пара для опытов, выполненных с системой метанол-изопропанол при высоте слоя жидкости, равной 6 мм. Видно, что значения проводимости пропорциональны скорости газа в степени, близкой к 0,7.

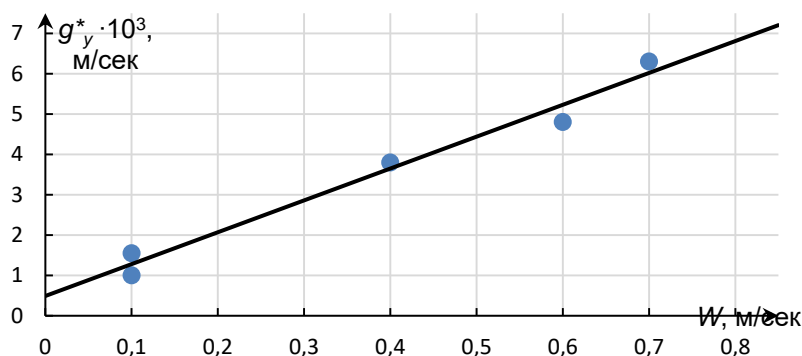


Рис. 6. Зависимость g_y^* от скорости пара: $h=6$ мм

На рисунке 7 показана зависимость g_y^* от симплекса (d/h) для серии опытов с приблизительно одинаковой скоростью пара, равной 0,15 м/сек. Симплекс (d/h) при

струйном истечении пара в жидкость характеризует геометрическое подобие, поэтому он принят для обобщения результатов в безразмерном виде.

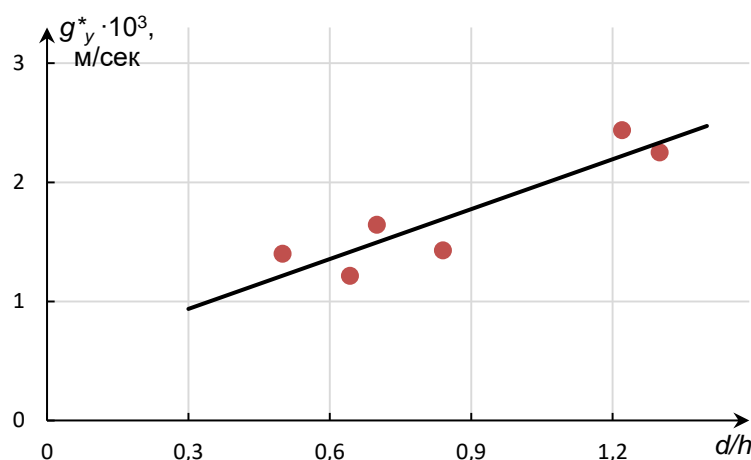


Рис. 7. Зависимость g_y^* от симплекса (d/h): $W = 0,15$ м/сек

Основываясь на работе [13], исследовавшей одиночный барботаж пара, результаты проделанного эксперимента представили в виде следующей зависимости для скорости массообмена в паровой фазе:

$$Nu = A Re^m Pr_d^n (d/h)^p, \quad (4)$$

где Nu – критерий Нуссельта, $Nu = (g_y^* \cdot d) / D_{\text{п}}$;

Re – критерий

са, $Re = (W \cdot d \cdot \rho_{\text{п}}) / \mu_{\text{п}}$;

Pr_d – критерий Прандтля диффузионный,

$Pr_d = \mu_{\text{п}} / (\rho_{\text{п}} \cdot D_{\text{п}})$;

$D_{\text{п}}$ – коэффициент диффузии пара, м²/сек;

$\rho_{\text{п}}$ – плотность пара, кг/м³;

$\mu_{\text{п}}$ – вязкость пара, (Н·сек)/м²;

A, m, n, p – коэффициент и показатели степени.

Показатель степени при критерии Pr_d был принят равным 0,5 на основе данных [4]. Остальные постоянные уравнения (4) находили методом множественной корреляции.

На рисунке 8 показан график корреляционной зависимости для опытов, выполненных с системами метанол-изопропанол и изопропанол-вода.

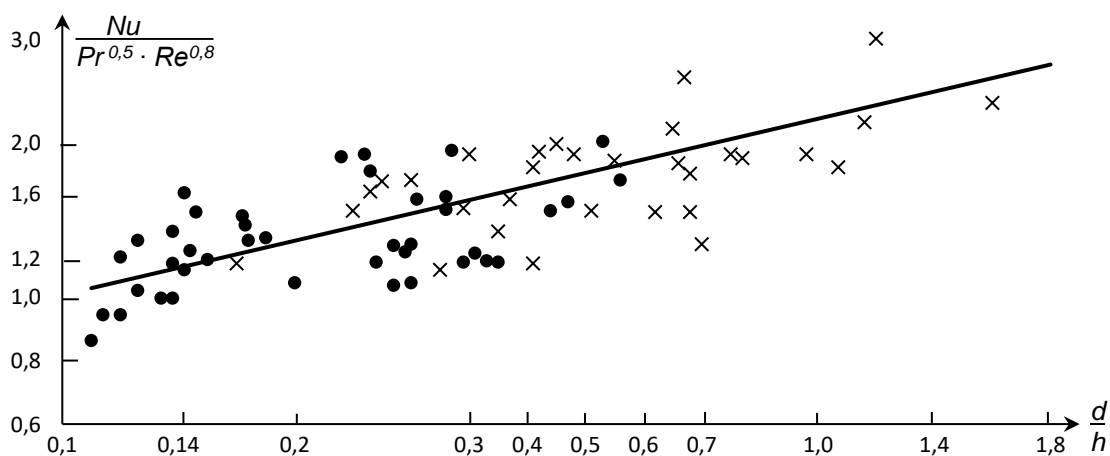


Рис. 8. Корреляционная зависимость для коэффициента скорости переноса вещества в паровой фазе: ● – метанол-изопропанол; × – изопропанол-вода

В таблице 3 приведены результаты статистической обработки уравнения (4).

Таблица 3. Результаты статистической обработки уравнения (4)

	Система							
	метанол-изопропанол				изопропанол-вода			
	Пределы изменения переменных		Коэффициент регрессии		Пределы изменения переменных		Коэффициент регрессии	
	min	max	рассчитанные	принятые	min	max	рассчитанные	принятые
Re	82	547	0,64	-	113	538	0,65	-
Pr_d	0,87	0,91	-	0,5	0,85	0,95	-	0,5
(d/h)	0,17	1,5	0,30	-	0,076	0,45	0,36	-

Библиографический список

1. Ульянов Б.А. Выражение скорости переноса вещества между паром и жидкостью в процессах барботаж // Гидродинамика и явления переноса в двухфазных дисперсных системах: сб. статей. 1976. С. 28–36.
2. Накоряков В.Е., Горин А.В. Тепломассоперенос в двухфазных системах. Новосибирск: Институт теплофизики, 1994. 431 с.
3. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчёт тепломассообменных процессов: монография. Казань: Изд-во Казанского государственного энергетического университета, 2007. 500 с.
4. Ульянов Б.А., Янчуковская Е.В., Родионов А.И. Исследование одиночного истечения пара бинарного состава в слое недогретой жидкости // Гидродинамика и явления переноса в двухфазных дисперсных системах: сб. статей. 1975. С. 3–18.
5. Берд Р., Стюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. М.: Химия, 1974. 688 с.
6. Ульянов Б.А., Янчуковская Е.В., Родионов А.И. Использование модели Рейнольдсового потока при анализе процессов взаимодействия пара и жидкости бинарного состава // Гидродинамика и явления переноса в двухфазных дисперсных системах: сб. статей. 1974. Ч. 1. С. 26–33.
7. Семенов И.А., Ульянов Б.А., Кулов Н.Н. Взаимодействие между паром и жидкостью с учетом неэквимолярности процесса массообмена // Теоретические основы химической технологии. 2015. Т. 49. № 6. С. 609–616.
8. Evans H.L. Mass transfer through laminar boundary layers – 7. Further similar solutions to the b-equation for the case $B = 0$ // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1962. Vol. 5. № 1-2. P. 35–57.
9. Кузнецов В.В. Тепломассообмен на поверхности раздела жидкость-пар // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 5. С. 97–107.
10. Кэйс В.М. Конвективный тепло- и массообмен. М.: Энергия, 1972. 446 с.
11. Ульянов Б.А., Родионов А.И., Янчуковская Е.В. Конденсация пара индивидуального вещества в слое недогретой жидкости // Гидродинамика и явления переноса в двухфазных дисперсных системах: сб. статей. 1975. С. 61–65.
12. Мазаев В.Н., Каталов А.И., Плановский А.Н. Расчёт массопередачи при ректификации многокомпонентных смесей // Теоретические основы химической технологии. 1980. Т. 14. № 1. С. 14–21.
13. Ульянов Б.А., Янчуковская Е.В., Родионов А.И., Щелкунов Б.И., Фереферов М.Ю. Массообмен между паром и жидкостью при ректификации бинарных смесей // Гидродинамика и явления переноса в двухфазных дисперсных системах: сб. статей. 1975. С. 19–32.

Сведения об авторах / Information about the Authors

Белоусов Дмитрий Сергеевич, магистрант группы ХТМ-20-1, Институт высоких технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация, e-mail: belousov_off@mail.ru

Янчуковская Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий, Институт высоких технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация, e-mail: lenyan@istu.edu

Dmitry S. Belousov, Postgraduate Student, Institute of High Technologies, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation, e-mail: belousov_off@mail.ru

Elena V. Yanchukovskaya, Cand. Sci. (Technics), Associate Professor of Chemical Technologies Department, Institute of High Technologies, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation, e-mail: lenyan@istu.edu