

Расчёт поверхности контакта фаз на тарелках массообменных колонн

© Д. С. Белоусов, Е. В. Янчуковская

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

Аннотация. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью корректирования степенной зависимости для удельной объёмной поверхности контакта фаз на тарелках массообменных колонн. Выдвинуто предположение о том, что изменение поверхностного натяжения жидкости приводит к усилению пенообразования и росту поверхности контакта, в связи с чем в формулу расчёта введён дополнительный множитель. Исследованы различные методы измерения поверхности систем газ-жидкость и пар-жидкость. Выполнен сравнительный анализ уравнений для расчёта поверхности контакта фаз на тарелках различных конструкций. Подтверждён вывод о влиянии запаса жидкости на тарелке, среднего поверхностно-объёмного диаметра пузырьков пара, свойств жидкой фазы на величину поверхности массообмена. Представлены результаты измерения поверхности в лабораторной колонне с ситчато-переточными тарелками при ректификации смеси этанол-вода. Эксперимент проведён при различных значениях скорости пара, высоты слоя пены, перепада давления на тарелке и концентрации этанола. Показаны графики сравнения величин удельной объёмной поверхности контакта фаз, полученных при разных методах её измерения. Приведены результаты статистической обработки предложенной степенной зависимости, показавшие, что введение экспоненциального множителя значительно улучшает корреляцию.

Ключевые слова: массообмен, колонна, провальная тарелка, пенообразование, удельная объёмная поверхность контакта фаз, методы исследования, средний диаметр пузырька, скорость газа, высота слоя светлой жидкости, поверхностное натяжение, корреляция

Calculation of the Phase Contact Surface on the Trays of Mass Transfer Columns

© Dmitry S. Belousov, Elena V. Yanchukovskaya

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

Abstract. The relevance of this work is due to the need to correct the power reciprocity law for the specific volumetric surface of phase contact on the trays of mass transfer columns. The article suggests that a change in the liquid surface tension leads to increased foaming and growth of the contact surface, and therefore an additional multiplier is introduced into the calculation formula. The article studies various methods of measuring the surface of gas-liquid and vapour-liquid systems. A comparative analysis of the equations for calculating the contact surface of phases on trays of various designs is performed. The conclusion about the influence of the liquid reserve on the tray, the average surface-volumetric diameter of the vapour bubbles, and the properties of the liquid phase on the value of the mass transfer surface has been confirmed. The article presents the results of measuring the surface in a laboratory column with sieve-overflow trays during the rectification of an ethanol-water mixture. The experiment has been carried out at various values of the vapour velocity, the height of the foam layer, the pressure drop across the tray, and the ethanol concentration. The article shows graphs for comparing the values of the specific volumetric surface of the phase contact, obtained with different methods of its measurement. The article presents the results of statistical processing of the proposed power dependence, which showed that the introduction of an exponential multiplier significantly improves the correlation.

Keywords: mass transfer, column, perforated tray, foaming, specific volumetric surface of phase contact, research methods, average bubble diameter, gas velocity, height of a layer of light liquid, surface tension, correlation

Для расчёта поверхности массообмена в тарельчатых колоннах необходимо знание величины поверхности контакта фаз и установление её зависимости от определяющих факторов [1].

Все распространённые тарелки колонн можно условно разделить на две группы: тарелки с противоположно направленным движением пара и жидкости и тарелки с перекрёстным движением потоков.

К первой группе относятся провальные тарелки без организованного перетока жидкости с вышележащей тарелки на нижележащую. Для них характерен пульсирующий режим работы, высота слоя пены зависит от перепада давления парового потока. На тех участках тарелки, где давление столба жидкости превышает сопротивление парового потока, происходит провал жидкости, который длится до момента восстановления равновесия. На каждом участке тарелки динамическое равновесие то нарушается, то восстанавливается, что приводит к дроблению потоков и образованию межфазной поверхности.

Исследования гидравлики тарелок без переливных устройств показали [2, 3], что величина поверхности контакта фаз и размер среднего диаметра пузырьков незначительно зависят от скорости газа (пара) в колонне. Большое влияние на величину слоя светлой жидкости оказывают геометрические характеристики тарелок: свободное сечение и диаметр отверстий тарелки.

При обобщении опытных данных запас жидкости на тарелке используют в качестве независимой переменной, в этом случае роль геометрических характеристик в межфазной поверхности оказывается несущественной, и ими можно пренебречь. Не обнаружили и заметного влияния физических свойств газовой фазы на величину образующейся поверхности контакта.

Были измерены величины межфазной поверхности при поглощении CO_2 растворами NaOH , KOH , LiOH , водоглицериновыми растворами NaOH на ситчатых провальных тарелках, и предложено расчётное уравнение для удельной объёмной поверхности [2].

$$a = 5 \cdot \frac{w^{0,15} \cdot \rho_{\text{ж}}^{0,35} \cdot \mu_{\text{ж}}^{0,25} \cdot g^{0,4}}{h_0^{0,25} \cdot \sigma^{0,6}} \cdot X, \quad (1)$$

где a – удельная объёмная поверхность, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

w – скорость газа (пара) в колонне, $\text{м}/\text{с}$;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$\mu_{\text{ж}}$ – вязкость жидкости, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;

σ – поверхностное натяжение, $\text{Н}/\text{м}$;

h_0 – высота слоя светлой жидкости на тарелке, м .

Сомножитель $X = 2,05 \cdot e^{-6 \cdot D}$ (D – диаметр колонны) учитывает роль диаметра колонны на образование межфазной по-

верхности. Однако для колонн диаметром более 120 мм влияние стенок почти не сказывается, в этом случае X принимают равным единице.

При исследовании световым методом барботаж воздуха через воду и чистые органические жидкости была получена зависимость удельной объёмной поверхности от высоты слоя светлой жидкости на тарелке [3]. При малых запасах жидкости удельная поверхность возрастала с увеличением h_0

$$a \sim h_0^{0,75},$$

при больших запасах – уменьшалась

$$a \sim h_0^{-0,25}.$$

Объясняется это тем, что при малой высоте слоя жидкости на тарелке газ проходил через неё без значительного дробления, а увеличение запаса жидкости в этих условиях способствовало лучшему дроблению газа. При больших высотах слоя жидкости энергии газа становится недостаточно, чтобы создать большую поверхность в единице объёма. На системе воздух-вода перелом наблюдался при $h_0 = 20$ мм, а на системе воздух-изопропанол – при $h_0 = 30$ мм. Область изменения и характер зависимости, вероятно, зависят от вязкости и плотности жидкой фазы:

при $h_0 < 20$ мм

$$a = 320 \cdot \frac{w^{0,15} \cdot \rho_{\text{ж}}^{0,35} \cdot \mu_{\text{ж}}^{0,25} \cdot g^{0,4} \cdot h_0^{0,75}}{\sigma^{0,6}} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{в}}}\right)^{-0,43}; \quad (2)$$

при $h_0 > 20$ мм

$$a = 6,4 \cdot \frac{w^{0,15} \cdot \rho_{\text{ж}}^{0,35} \cdot \mu_{\text{ж}}^{0,25} \cdot g^{0,4}}{h_0^{0,25} \cdot \sigma^{0,6}} \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{в}}}\right)^{-0,43} \quad (3)$$

где $\mu_{\text{в}}$ – вязкость воды, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

С учётом того, что в момент отрыва пузырька от отверстия объёмные силы и силы поверхностного натяжения равны и соседние пузырьки сливаются, были предложены уравнения для расчёта среднего поверхностно-объёмного диаметра пузырьков в дисперсном слое [4].

При

$$\sqrt{\frac{3 \cdot \sigma}{\rho_{\text{ж}} \cdot g}} > \frac{d_0}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{F_c}}$$

$$d_{\text{ср}} = \frac{\pi}{2(1 - \varphi_{\Gamma})} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma}{\rho_{\text{ж}} \cdot g}};$$

при

$$\sqrt{\frac{3 \cdot \sigma}{\rho_{\text{ж}} \cdot g}} < \frac{d_0}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{F_c}}$$

$$d_{\text{ср}} = \frac{6 \cdot \sigma}{\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot d_0(1 - \varphi_{\Gamma})},$$

где $d_{\text{ср}}$ – средний поверхностно-объемный диаметр пузырьков, м;

F_c – доля свободного сечения отверстий, $\text{м}^2/\text{м}^2$;

φ_{Γ} – газосодержание, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

d_0 – диаметр отверстий, м.

Удельная объемная поверхность рассчитывается следующим образом:

$$a = 6 \cdot \varphi_{\Gamma} / d_{\text{ср}}.$$

Химическим методом исследования поверхности контакта на провалных тарелках были установлены две области с разным влиянием высоты слоя жидкости на величину поверхности [5]:

при $h_0 < 10$ мм

$$a = 356 \cdot \frac{\rho_{\text{ж}}^{0,35} \cdot \mu_{\text{ж}}^{0,25} \cdot g^{0,35} \cdot h_0^{0,75}}{\sigma^{0,6}}; \quad (4)$$

при $h_0 > 10$ мм

$$a = 20 \cdot \frac{\rho_{\text{ж}}^{0,35} \cdot \mu_{\text{ж}}^{0,25} \cdot g^{0,35}}{\sigma^{0,6}}. \quad (5)$$

Для измерения межфазной поверхности при ректификации бинарных [6] и многокомпонентных смесей [7] использовали метод деполяризации света. Величина поверхности контакта возрастала с увеличением запаса жидкости на тарелке во всём диапазоне изменения h_0 :

$$a \sim h_0^{0,75}.$$

Отсутствие различий в характере данных зависимости объясняется тем, что исследованные жидкости при высокой температуре

имели малую вязкость, и уменьшение удельной поверхности должно было бы наступить при большей высоте слоя жидкости, чем использованная в опытах.

Другой особенностью парожидкостных дисперсий по сравнению с газожидкостными является изменение поверхностного натяжения жидкости в процессе массообмена. При разделении «положительных смесей», для которых поверхностное натяжение уменьшается с ростом концентрации низкокипящего компонента, наблюдалось некоторое увеличение пенообразования. Для учёта данного факта в формулу расчёта поверхности контакта был введён множитель, учитывающий изменение σ в процессе массообмена

$$a = 340 \cdot \frac{w^{0,15} \cdot \rho_{\text{ж}}^{0,35} \cdot \mu_{\text{ж}}^{0,25} \cdot g^{0,4} \cdot h_0^{0,75}}{\sigma^{0,6} \cdot e^{(1 - \sigma_{\text{м}}/\sigma_{\text{б}})}}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{м}}$ и $\sigma_{\text{б}}$ – меньшее и большее из поверхностных натяжений смеси на тарелке в конденсате труднолетучего компонента.

При ректификации нейтральных смесей формула расчёта поверхности контакта имеет вид

$$a = 340 \cdot \frac{w^{0,15} \cdot \rho_{\text{ж}}^{0,35} \cdot \mu_{\text{ж}}^{0,25} \cdot g^{0,4} \cdot h_0^{0,75}}{\sigma^{0,6}}. \quad (7)$$

При обобщении данных по поверхности контакта на тарелках с перекрёстным движением потоков использовали положения о дроблении пузырьков газа турбулентными пульсациями жидкости, развитые А. Н. Колмогоровым применительно к дроблению капель в поле однородной и изотропной турбулентности [8], что позволило представить изменение пульсационной скорости независимо от направления в виде

$$v_{\lambda} = \frac{\varepsilon}{\rho_{\text{ж}}} \cdot \lambda,$$

где v_{λ} – пульсационная скорость;
 ε – потеря энергии в единице объёма за единицу времени;
 λ – масштаб пульсации.

Так как величина ε не зависит от масштаба пульсации λ , то она пропорциональна удельной энергии пенного слоя

$$\varepsilon \sim \rho_{\text{ж}} \cdot w.$$

Методом светоотражения была определена поверхность контакта на ситчатой тарелке и получено уравнение для её расчёта

$$a = 10^4 \cdot \left[\frac{(\rho/\nu)^{0,4} \cdot \rho_{ж}^{0,2}}{\sigma^{0,6}} \right] w^{0,5}, \quad (8)$$

где $(\rho/\nu) \sim w \cdot \rho_{ж} \cdot g$ удельная энергия, вводимая в газожидкостный слой.

Метод измерения поверхности, основанный на известной скорости химической реакции [9, 10], для ситчатых переточных тарелок позволил вывести следующее уравнение

$$a = 0,72 \cdot \left[\frac{w^{0,4} \cdot \rho_{ж}^{0,5} \cdot g^{0,4}}{\sigma^{0,6}} \right] \cdot \varphi_{\Gamma}^{0,3}. \quad (9)$$

Для колпачковых, колпачково-ситчатых, клапанных тарелок получены зависимости такого же вида, отличающиеся лишь коэффициентами пропорциональности.

Calderbank P. H. [11] установил аналогичную зависимость от вводимой в систему мощности при барботаже газа через чистые жидкости в аппаратах с мешалками

$$a = 0,0098 \cdot \left[\frac{(\rho/\nu)^{0,4} \cdot \rho_{ж}^{0,2}}{\sigma^{0,6}} \right] \cdot \left(\frac{w}{w_{\Pi}} \right)^{0,5}, \quad (10)$$

где w_{Π} – скорость всплывания пузырька, м/с.

Сходство уравнений для поверхности контакта на переточной тарелке и в аппаратах с мешалками можно объяснить тем, что дробление газа в обоих случаях происходит под действием равномерно вводимой мощности в газожидкостный слой.

На тарелках без переливных устройств пульсации в подаче газа через определённые группы отверстий, вызванные временными нарушениями динамического равновесия, в большей мере являются причиной дробления газа, чем и объясняется меньшая зависимость удельной объёмной поверхности от скорости газа на провальных тарелках.

В колонне диаметром 112 мм ($F_c = 0,056 \text{ м}^2/\text{м}^2$; $d_0 = 2,5 \text{ мм}$; высота переливной планки $h_{\Pi} = 31 \text{ мм}$ и 47 мм) с ситчато-переточными тарелками [12] была выполнена серия опытов по ректификации смеси этанол-вода. В таблице представлены результаты измерения удельной объёмной поверхности при различных значениях скорости пара в колонне, перепада давления на тарелке, высоты пены и концентраций этилового спирта.

Результаты измерения поверхности контакта в колонне

№ п/п	Скорость пара, w, м/с	Высота пены, H _п , мм	Перепад давления на тарелке, ΔP, Па	Концентрация этанола		Удельная объёмная поверхность, a, м ² /м ³
				в жидкости, м.д.	в паре над тарелкой, м.д.	
1	0,74	36	212	0,068	0,355	609
2	0,77	36	216	0,067	0,359	603
3	0,76	36	225	0,078	0,347	667
4	0,77	36	243	0,052	0,328	600
5	0,77	37	235	0,095	0,416	640
6	0,80	42	231	0,132	0,467	700
7	0,83	36	223	0,128	0,435	630
8	0,83	36	210	0,111	0,421	633
9	0,72	37	248	0,009	0,098	515
10	0,77	37	247	0,008	0,075	473
11	0,77	37	235	0,011	0,101	600
12	0,77	37	274	0,015	0,154	662
13	0,89	32	321	0,000	0,000	418
14	0,91	32	321	0,000	0,000	421
15	0,91	32	321	0,000	0,000	420
16	0,94	32	321	0,000	0,000	419
17	0,86	39	390	0,000	0,000	434
18	0,72	39	212	0,153	0,456	780
19	0,72	39	212	0,172	0,495	772

С целью сопоставления значений поверхности контакта на провальных тарелках был выполнен расчёт по зависимостям

(1–10). Скорость пара при этом варьировали от 0,3 до 1,2 м/с; высоту светлого слоя жидкости на тарелке изменяли от 4 до 52 мм;

концентрацию спирта в жидкости принимали в пределах от 0 до 13 % моль. Физические свойства жидкости рассчитывали при температуре её кипения.

Расчёты показали, что зависимости (1), (3) и (5), полученные на холодных системах, дают сильно отличающиеся значения поверхности от соответствующих величин

уравнений (6) и (7), что объясняется разным влиянием запаса жидкости на величину межфазной поверхности.

Расчёты по (2), (4) и (7) показывают хорошее совпадение значений a . На рисунках 1 и 2 представлено сравнение величин поверхности, рассчитанных по этим зависимостям для системы вода-водяной пар.

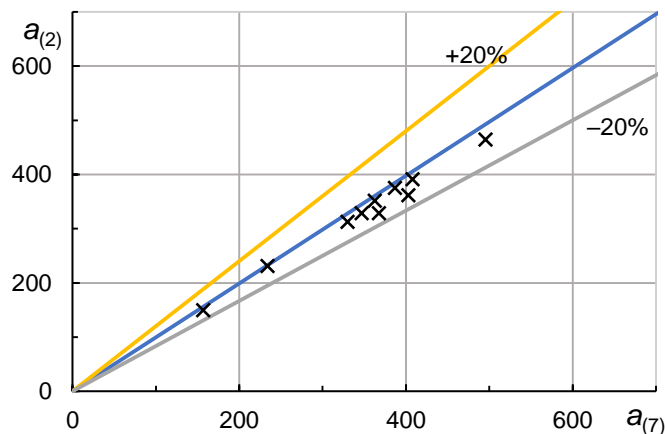


Рис. 1. Сравнение величин поверхности контакта фаз, рассчитанных по (2) и (7): система вода-водяной пар

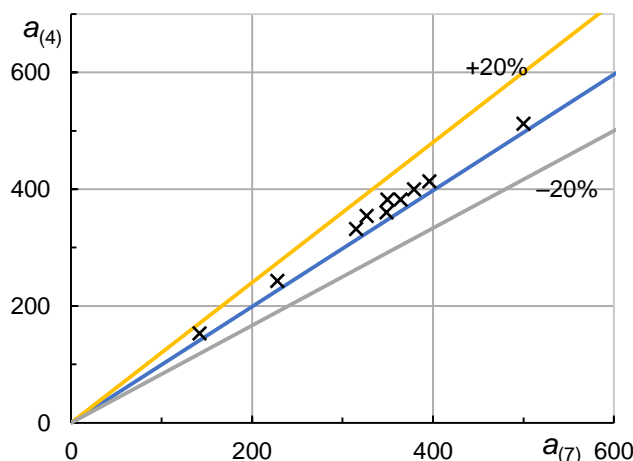


Рис. 2. Сравнение величин поверхности контакта фаз, рассчитанных по (4) и (7): система вода-водяной пар

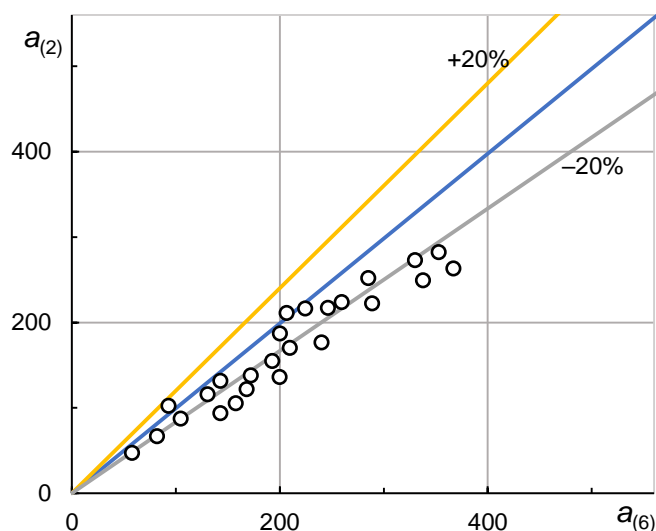


Рис. 3. Сравнение величин поверхности контакта фаз, рассчитанных по (2) и (6): система вода-этиловый спирт

Сопоставленные поверхности контакта для водно-спиртовых смесей, рассчитанные по (2) и (6), показаны на рисунке 3. Видно, что расчёт по (6) даёт более высокое значение поверхности по сравнению с (2), что обусловлено учётом изменения поверхностного натяжения в процессе массообмена при ректификации положительной водно-спиртовой смеси.

Сравнение величин поверхности по (6) и (4) показано на рисунке 4. Очевидно, что уравнение (4) непригодно для расчёта поверхности контакта при интенсивных режимах барботаж, так как не учитывает влияния важных гидравлических факторов: высоты слоя жидкости на тарелке и скорости газа в колонне.

На рисунке 5 сравниваются величины поверхности, измеренные при ректификации воды и водно-спиртовой смеси (табл.), с величинами, рассчитанными по (9).

Видно, что для чистой воды измеренная и рассчитанная поверхности близки, а для водно-спиртовой смеси поверхности различаются, причём отклонения величин выходят за пределы точности зависимости (9). Можно предположить, что при ректификации водно-спиртовых смесей как на ситчато-переточных, так и на провальных тарелках изменение поверхностного натяжения, вызванное массообменом, приводит к увеличению пенообразования и росту поверхности контакта фаз.

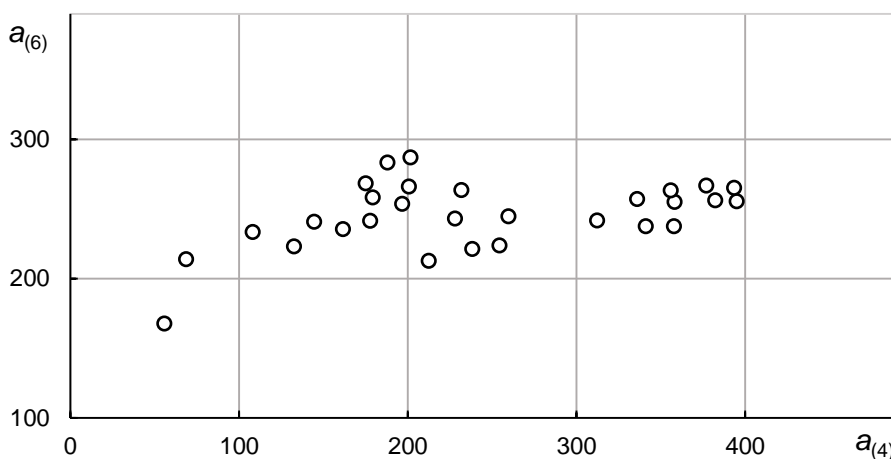


Рис. 4. Сравнение величин поверхности контакта фаз, рассчитанных по (6) и (4): система вода-этиловый спирт

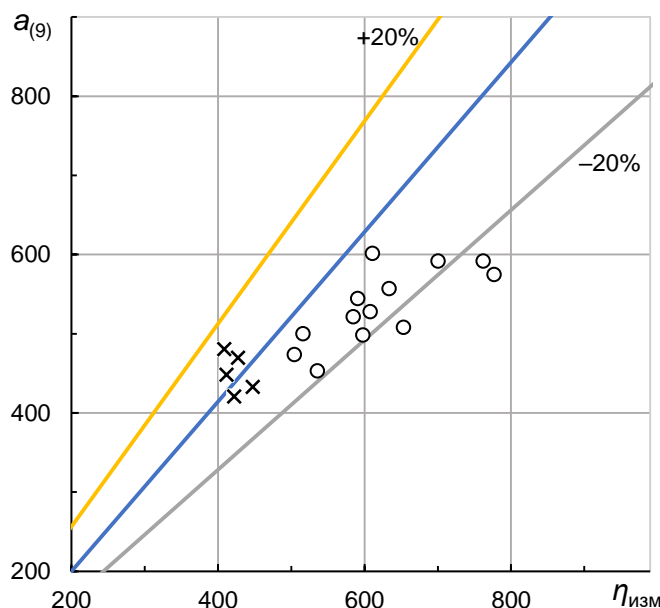


Рис. 5. Сравнение величин поверхности контакта фаз измеренных и рассчитанных по (9): x – система вода-водяной пар; o – система вода-этиловый спирт

Для учёта данного явления в зависимость (9) был введён дополнительный множитель, показатель степени которого b_1 и коэффициент b_0 найдены методом наименьших квадратов и равны соответственно $b_1 = 1,29 \pm 0,18$; $b_0 = 0,73$.

$$\frac{a}{\left[\frac{W^{0,4} \cdot \rho_{\text{ж}}^{0,5} \cdot g^{0,4}}{\sigma^{0,6}} \right] \cdot \varphi_{\Gamma}^{0,3}} = b_0 [e^{(1-\sigma_{\text{м}}/\sigma_{\text{б}})}]^{b_1}$$

Результаты статистической обработки следующие: пределы изменения комплекса $1,0 \div 1,37$; коэффициент корреляции $R = 0,859$; остаточная дисперсия $S = 0,0081$; дисперсное отношение $F = 3,39$; критерий Стьюдента $t = 7,15$. Большие значения коэффициента корреляции и дисперсного отношения указывают на то, что между комплексами в правой и левой части имеется тесная связь, следовательно, введение экспоненциального множителя значительно улучшит корреляцию [13].

Список источников

1. Ульянов Б. А. Поверхность контакта фаз и массообмен в тарельчатых ректификационных аппаратах. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1982. 130 с.
2. Родионов А. И., Ульянов Б. А., Винтер А. А., Перочинская М. Б. Определение межфазной поверхности в процессе абсорбции CO_2 раствором NaOH различными методами // Тр. МХТИ им. Д. И. Менделеева. М., 1969. Вып. 60. С. 169–171.
3. Ульянов Б. А., Родионов А. И., Янчуковская Е. В. Структура двухфазных слоев и величина межфазной поверхности на контактных тарелках ректификационных и абсорбционных колонн // Теоретические основы химической технологии. 1982. Т. 16. № 4. С. 491–498.
4. Sasvari Gy., Hites F., Blickle T. Study of dynamic foams // Akta Chimica Scientiarum Hungarica. 1971. Vol. 70 (4). P. 395–412.
5. Родионов А. И., Зенков В. В., Владимиров А. Н. Константа скорости реакции окисления водных растворов сульфата натрия кислородом воздуха и поверхность контакта фаз в колоннах с провальной тарелкой // Журнал прикладной химии. 1974. Т. 47. № 11. С. 2468–2474.
6. Ульянов Б. А., Шелкунов Б. И., Буренко В. А., Родионов А. И. Поверхность контакта фаз при ректификации бинарных и тройных смесей // Гидродинамика и явления переноса в двухфазных дисперсных системах. Иркутск, 1974. С. 3–10.
7. Ульянов Б. А., Родионов А. И., Буренко В. А., Шелкунов Б. И. Поверхность контакта на провальных тарелках ректификационных колонн // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 1978. Т. 21. № 12. С. 1815–1818.
8. Колмогоров А. Н. О дроблении капель в турбулентном потоке // Доклады Академии наук СССР. 1949. Т. 66. № 5. С. 825–828.
9. Родионов А. И., Винтер А. А. Исследование химическим методом поверхности контакта фаз на ситчатых тарелках // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 1967. Т. 10. № 1. С. 102–106.
10. Ульянов Б. А., Янчуковская Е. В., Шерстова Л. Н., Петушинский Л. Н. Эффективность тарельчатых массообменных аппаратов и поверхность контакта фаз // Гидродинамика и явления переноса в двухфазных дисперсных системах. 1980. С. 43–47.
11. Calderbank P. H. Physical rote processes in industrial fermentation: Part I – The interfacial area in gas-fluid contacting with mechanical agitation // Transactions of the Institution of Chemical Engineers. 1958. Vol. 36. № 6. P. 443–463.
12. Ульянов Б. А., Янчуковская Е. В., Родионов А. И., Шелкунов Б. И., Фереферов М. Ю. Массообмен между паром и жидкостью при ректификации бинарных смесей // Гидродинамика и явления переноса в двухфазных дисперсных системах. 1975. С. 19–32.
13. Ульянов Б. А., Шелкунов Б. И., Янчуковская Е. В. Сравнительный анализ зависимостей для расчета поверхности контакта фаз на тарелках массообменных колонн // Гидродинамика и явления переноса в двухфазных дисперсных системах. 1977. С. 50–60.

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, Рос-
сийская Федерация,
e-mail: belousov_off@mail.ru

Янчуковская Елена Владимировна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры химической технологии
им. Н. И. Ярополова,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Рос-
сийская 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. of Sci. (Technics),
Associate Professor of the Department of Chem-
ical Technology named after N. I. Yaropolov,
Institute of High Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian
Federation,
e-mail: lenyan@istu.edu