

Межфазная поверхность на контактных тарелках абсорбционных и ректификационных колонн

© 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 расчета поверхности контакта фаз на провальных, переточных ситчатых, клапанных тарелках абсорбционных и ректификационных колонн. С этой целью проведены исследования массообмена между паром и жидкостью при ректификации бинарных и многокомпонентных смесей, ректификации чистых жидкостей и абсорбции углекислого газа из воздуха раствором щелочи. Представлено описание полупромышленной установки для разделения большого количества смесей и методика проведения эксперимента. Составлена математическая модель процесса. Определена удельная объемная поверхность контакта фаз, установлено ее распределение по высоте слоя жидкости на тарелке. Увеличение удельной объемной поверхности с ростом запаса жидкости объясняется лучшим дроблением пара и образованием более мелких пузырьков. Проведено сравнение результатов измерения поверхности химическим и световым методами. Установлено влияние поверхностного натяжения жидкости на величину межфазной поверхности перфорированных тарелок. Методом множественной корреляции рассчитаны показатели степенной зависимости поверхности контакта провальных и клапанных тарелок. Для учета влияния поверхностного натяжения введен критерий Вебера. Отмечена справедливость обобщенной зависимости для ректификации тройных смесей и испарительного охлаждения жидкостей. Показано влияние диаметра колонны на величину удельной поверхности контакта фаз. Установлено, что полученные зависимости применимы для расчета поверхности в аппаратах диаметром более 150 мм. В качестве характерного линейного размера при обобщении опытных данных по тепло- и массообмену в барботажных слоях может быть использован средний поверхностно-объемный диаметр пузырьков пара.

Ключевые слова: ректификация, абсорбция, колонна, провальные тарелки, удельная объемная поверхность контакта фаз, поверхность контакта, отнесенная к единице площади тарелки, запас жидкости, диаметр пузырька, степенная зависимость

Interface Surface on Contact Trays of Absorption and Rectification 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 obtain power dependence for calculating the contact surface of phases on perforated, over-flow, sieve, and valve trays of absorption and rectification columns. For this purpose, studies of mass transfer between vapour and liquid have been carried out during the rectification of binary and multicomponent mixtures, the rectification of pure liquids and the absorption of carbon dioxide from the air with an alkali solution. The article presents a description of a semi-industrial plant for separating a large number of mixtures and an experimental technique. A mathematical process model has been drawn up. The specific volumetric surface of the phase contact has been determined; its distribution over the height of the liquid layer on the tray has been established. The increase in the specific volumetric surface with an increase in the liquid supply is due to the better fragmentation of the vapour and the formation of smaller bubbles. A comparison of the results of surface measurements by chemical and light methods has been carried out. The effect of the surface tension of the liquid on the value of the interfacial surface of the perforated trays has been established. Power dependence of the contact surface of the perforated and valve trays has been calculated by the method of multiple correlations. To take into account the effect of surface tension, the Weber criterion is introduced. The article notes the validity of the generalized dependence for the rectification of ternary mixtures and evaporative cooling of liquids. The paper shows the effect of the column diameter on the value of the specific phase contact surface. It was found that the obtained dependences are applicable for calculating the surface in devices with a diameter of more than 150 mm. The average surface-volumetric diameter of vapor bubbles can be used as a characteristic linear size when generalizing experimental data on heat and mass transfer in bubbling layers.

Keywords: rectification, absorption, column, perforated trays, specific volumetric surface of phase contact, contact surface per unit area of the tray, liquid reserve, bubble diameter, power dependence

Скорость процессов тепло- и массообмена, протекающих на контактных тарелках ректификационных и абсорбционных колонн, во многом определяется величиной поверхности, создаваемой между газом (паром) и жидкостью [1].

Для измерения поверхности контакта разработаны методы, основанные на различных физических эффектах и на проведении химических реакций [2].

В таблице 1 представлена сравнительная характеристика методов.

Таблица 1. Сравнительная характеристика методов измерения межфазной поверхности на контактных тарелках

№ п/п	Метод измерения	Измеряемая величина	Данные измерения	Применение и условия применимости	Достоинства	Недостатки
1	2	3	4	5	6	7
1	Метод фотографирования	Размеры пузырьков и их число	Средний поверхностно-объемный диаметр пузырька и газосодержание слоя	Наличие аппаратов с прозрачными стенками (участками)	Наглядная картина пенного слоя у стенки аппарата	Измеряется величина поверхности вблизи стенки. Большие затраты времени
2	Метод отражения светового потока	Интенсивность отраженного света	Величина удельной межфазной поверхности	Наличие аппаратов с прозрачными стенками (участками)	Быстрота измерения и обработки результатов	Измеряется величина поверхности вблизи стенки. Требуется предварительная тарировка прибора
3	Зондовая измерительная техника	Размеры пузырьков	Средний поверхностно-объемный диаметр пузырьков и газосодержание слоя	Чистота газожидкостных слоев	Получение сведений о структуре слоя в разных участках аппарата	Большие затраты времени
4	Метод светорассеяния	Интенсивность света, прошедшего сквозь слой	Величина удельной объемной поверхности	Малый размер дисперсных частиц	Быстрота измерения и обработки результатов	Требуется предварительная тарировка прибора
5	Химический метод	Количество вещества, вступившего в химическую реакцию	Величина межфазной поверхности	Известны кинетика реакции и константы скорости химических превращений	Сравнительно небольшие затраты времени. Независимость от структуры и геометрических характеристик системы	Измерения зависят от реагирующих веществ
6	Метод просвечивания слоя поляризованным монохроматическим светом	Степень поляризации света	Величина удельной объемной поверхности	Чистота газожидкостного слоя. Толщина просвечиваемого слоя не больше 150–200 мм	Быстрота измерения и обработки результатов. Получение сведений о поверхности в разных сечениях слоя	Требуется предварительная тарировка прибора
7	Электроконтактные методы	Измеряется число замыканий и размыканий электрической цепи	Средний поверхностно-объемный диаметр пузырьков. Газосодержание слоя	Электропроводность жидкости. Не слишком малые размеры пузырьков	Быстрота измерений и обработки результатов. Получение сведений о структуре слоя в разных участках аппарата	Сложность аппаратного оформления

Величину межфазной поверхности определяли при ректификации бинарных и многокомпонентных смесей, с испарительным охлаждением ряда жидкостей, а также при

карбонизации щелочи.

В таблице 2 приведены данные об исследованных процессах.

Таблица 2. Характеристика процессов и аппаратов

№ п/п	Процесс	Размеры колонны, мм	Тип тарелок	Количество опытов
Ректификация смесей				
1	Метанол-изопропанол	Ø112	Провальные дырчатые	27
2	Метанол-изопропанол	Ø200	"-	31
3	Этанол-вода	Ø112	"-	61
4	Изопропанол-вода	"-	"-	13
5	Метанол-этанол-изопропанол	"-	"-	27
6	Метанол-изопропанол-вода	"-	"-	30
Ректификация чистых жидкостей				
7	Вода	"-	"-	7
8	Изопропанол	"-	"-	10
Испарение				
9	Воды в воздух	Ø131	"-	21
10	Воды в воздух	40x60	"-	65
11	Изопропилового спирта в воздух	"-	"-	29
12	Уксусного ангидрида в воздух	"-	"-	3
13	Серного эфира в воздух	"-	"-	7
14	Этилацетата в воздух	"-	"-	6
15	Изоамилового спирта в воздух	"-	"-	3
16	н-Пропилового спирта в воздух	"-	"-	11
17	н-Бутилового спирта в воздух	"-	"-	13
18	н-Декана в воздух	"-	"-	3
19	Метилового спирта в воздух	"-	"-	6
20	н-Гептана в воздух	"-	"-	14
21	н-Гексана в воздух	"-	"-	2
22	Четыреххлористого углерода в воздух	"-	"-	1
23	Абсорбция CO ₂ из воздуха 1,8 н раствором NaOH	40x60	Переточная ситчатая	8

Большую часть измерений выполняли методом просвечивания двухфазного слоя монохроматическим поляризованным светом с помощью специального прибора.

Для проведения процесса абсорбции тарги колонны были изготовлены из органического стекла. Для осуществления ректификации использовали тарги, представляющие собой два концентрически расположенных стеклянных цилиндра, воздушная

прослойка между которыми теплоизолировала колонну от окружающей среды. Прибором определяли локальное значение удельной поверхности контакта фаз.

На рисунке 1 показано изменение удельной объемной поверхности α м²/м³ по высоте слоя светлой жидкости на тарелке $h_0 = 12$ и 19 мм при скорости газа в колонне $W_r = 0,5 \div 0,51$ м/с.

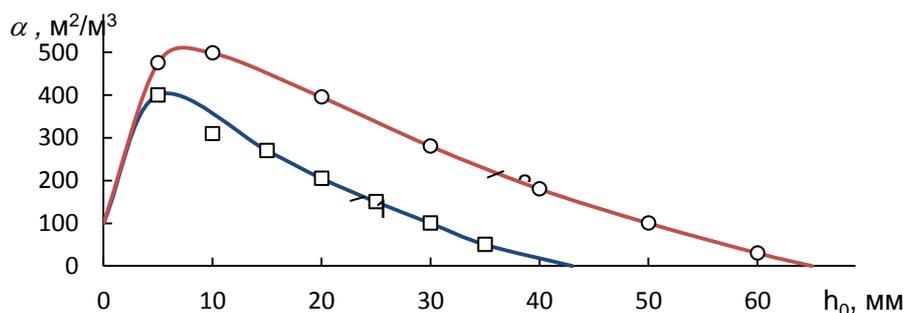


Рис. 1. Распределение поверхности контакта фаз по высоте слоя: 1 – этанол-вода $W_r = 0,5$ м/с, $h_0 = 12$ мм; 2 – вода-воздух $W_r = 0,51$ м/с, $h_0 = 19$ мм

Видна аналогичность кривых для паро-жидкостных и газожидкостных систем. Резкое увеличение поверхности вблизи тарелки можно объяснить интенсивным дроблением струй на пузырьки разного диаметра при выходе пара из отверстий. В более высоких слоях происходит коалесценция пузырьков, способствующая увеличению их диаметра и уменьшению поверхности [3].

Интегрируя кривые распределения, определили среднюю объемную поверх-

ность α м²/м³ и величину поверхности, отнесенную к единице площади тарелки A м²/м².

Химический метод измерения позволяет найти интегральное значение поверхности контакта во всем слое жидкости. С этой целью использовали поглощение СО₂ из смеси с воздухом растворами NaOH.

Сопоставление результатов измерения удельной объемной поверхности химическим и световым методами представлено на рисунке 2.

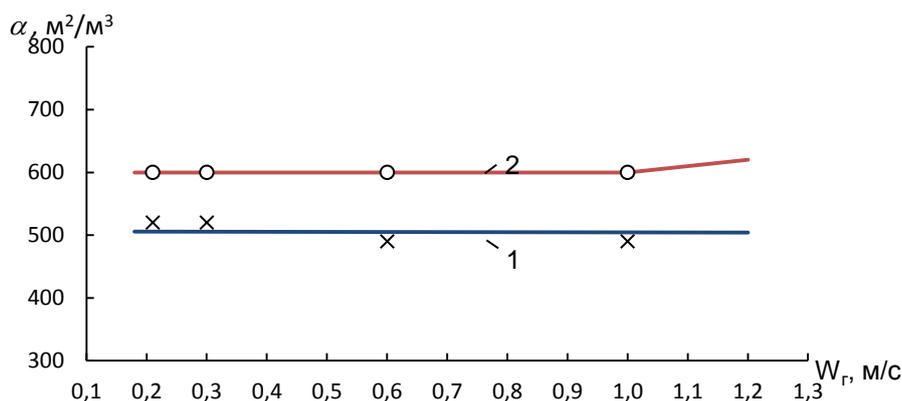


Рис. 2. Зависимость удельной объемной поверхности от скорости газа на ситчатой тарелке: 1 – светопросвечивание; 2 – химический метод

Разница в результатах составляет ± 20 % от средней величины удельной объемной поверхности. Некоторое превышение значений α при абсорбции СО₂ щелочью можно объяснить тем, что химический метод учитывает поверхность контакта в сливном кармане и брызгах жидкости, находящейся над пенным слоем.

Таким образом, исследования межфазной поверхности на перфорированных тарелках показывают, что основными факторами, влияющими на ее величину, являются высота слоя жидкости на тарелке, скорость газа (пара) в колонне и физические свойства системы, особенно поверхностное натяжение жидкости σ н/м [4, 5].

Устойчивый размер пузырьков в потоке определяется равенством динамического напора и капиллярного давления

$$\frac{\xi}{2} \cdot \rho_{\Gamma} \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{2 \cdot \sigma}{d_{\Pi}}, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент трения на границе раздела фаз газ (пар) – жидкость; v – пульсационные скорости, действующие на противоположные стороны пузырька; ρ_{Γ} – плот-

ность газа, кг/м³; d_{Π} – средний поверхностно-объемный диаметр пузырька, м.

Если динамический напор превышает капиллярное давление, начинается деформация пузырьков, заканчивающаяся их дроблением.

В условиях однородной и изотропной турбулентности изменение пульсационной скорости на участке длиной d_{Π} определяется как [6, 7, 8]

$$\Delta v = \left(\frac{\varepsilon}{\rho_{\Gamma}} \cdot d_{\Pi} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где ε – энергия, вводимая в единицу объема двухфазного слоя.

Тогда

$$d_{\Pi} \sim \sigma^{-2/3}. \quad (3)$$

На рисунке 3 показана зависимость удельной объемной поверхности контакта фаз от запаса жидкости на тарелке при барботаже воздуха через воду и при ректификации смеси метанол-изопропанол. Разницу в значениях величины α можно объяснить различием поверхностного натяжения жидкостей.

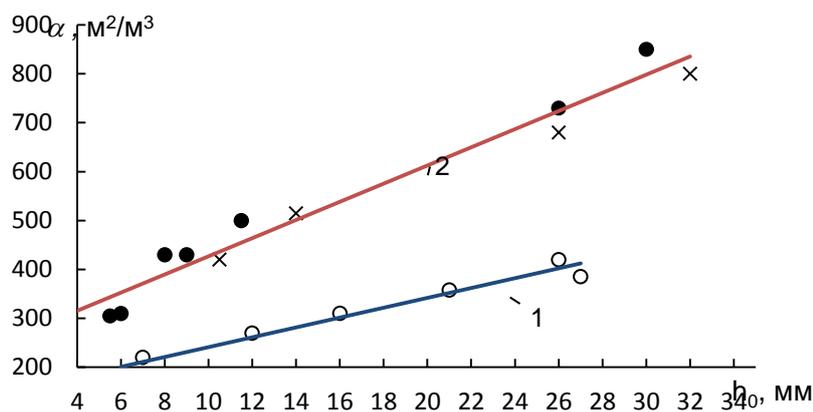


Рис. 3. Зависимость удельной объемной поверхности от запаса жидкости: 1 – вода-воздух $W_r = 1,0$ м/с; 2 – метанол-изопропанол, изопропанол-воздух $W_r = 1,05$ м/с

С целью учета влияния поверхностного натяжения жидкости в расчетные зависимости вводится критерий Вебера

$$We = \frac{\sigma}{\rho_{ж} \cdot g \cdot h_0^2}, \quad (4)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Обобщение опытных данных осуществляли с использованием работ Колара, в которых выполнен теоретический анализ структуры пенных слоев на перфорированных тарелках.

При условии пренебрежения весом газовой фазы составляется баланс количества движения в слое. Слой при этом рассматривается как пористый, сформированный частицами жидкости, через который движется газ. В этом случае коэффициент ξ является функцией локального значения газосодержания слоя ψ , $\text{м}^3/\text{м}^3$

$$\xi = \xi(\psi). \quad (5)$$

Вид этой функции найден методом вариационного исчисления, выражение для рас-

пределения газосодержания по высоте слоя можно записать как

$$\frac{dx}{h_0} = \frac{\varphi_0 \cdot \varphi_H}{\varphi_H - \varphi_0} \cdot \frac{d\psi}{\psi^2(1-\psi)}, \quad (6)$$

где φ – фиксированное значение газосодержания слоя, $\text{м}^3/\text{м}^3$; x – координата.

Проверку зависимости (6) выполняли измерением профиля газосодержания, просвечивая слой γ -лучами.

Наблюдались большие расхождения между газосодержанием в области, прилегающей к тарелке, и значениями φ_0 , предсказываемыми зависимостью (6).

В то же время для каждого опыта было найдено газосодержание $\varphi_{\text{опт}}$ на некотором удалении от тарелки, подстановка которого в (6) вместо φ_0 приводила к хорошему совпадению измеренных и рассчитанных профилей газосодержания.

Опытных данных для установления связи $\varphi_{\text{опт}}$ со скоростью газа и запасом жидкости на тарелке было недостаточно, поэтому проверили связь $\varphi_{\text{опт}}$ со средним газосодержанием слоя φ_r , представленную на рисунке 4.

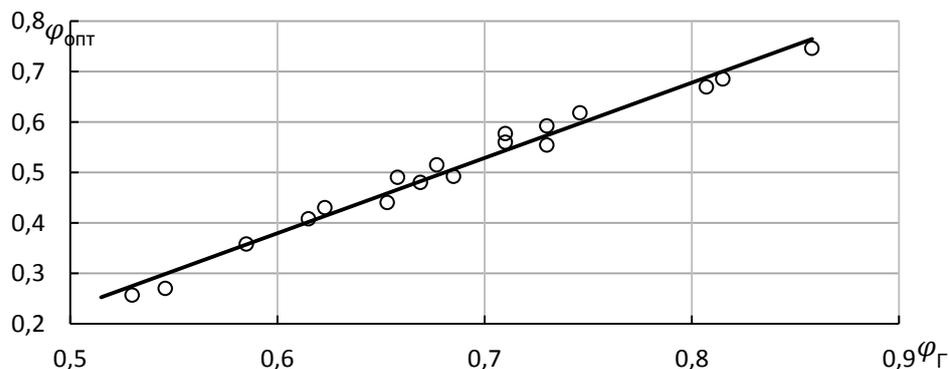


Рис. 4. Корреляция между $\varphi_{\text{опт}}$ и средним газосодержанием слоя φ_r

Из рисунка 4 видна тесная связь $\varphi_{\text{опт}}$ и $\varphi_{\text{г}}$, которая позволяет заменить трудно определяемый параметр $\varphi_{\text{опт}}$ средним газосодержанием пенного слоя $\varphi_{\text{г}}$.

Изменение удельной энергии газового потока связано с преодолением сил трения на поверхности раздела фаз. Учитывая связь между изменением межфазной поверхности и газосодержанием, связь газосодержания с координатой x по уравнению (6), а также то, что изменение давления по высоте слоя связано с газосодержанием по уравнению (7)

$$\frac{dP}{dx} = -\left(\frac{\Delta P_{\text{ГЖ}}}{h_0}\right)(1 - \psi), \quad (7)$$

получим степенную зависимость поверхности контакта фаз от определяющих факторов

$$A \sim \left(\frac{\varphi_0}{1 - \varphi_0}\right)^{b_1} \left(\frac{\Delta P_{\text{ГЖ}} \cdot h_0}{W_{\text{г}} \cdot \mu_{\text{г}}}\right)^{b_2}, \quad (8)$$

где $\Delta P_{\text{ГЖ}}$ – сопротивление газожидкостного слоя, которое должно быть найдено экспериментально или рассчитано по эмпирическим уравнениям, н/м² [9]; $\mu_{\text{г}}$ – вязкость газа, н·с/м².

Отсутствие в данной зависимости величины σ объясняется тем, что, составляя баланс энергии, не учли действие сил поверхностного натяжения.

В то же время теория и эксперимент показывают большое влияние сил поверхностного натяжения на формирование двухфазных слоев.

В связи с этим для учета влияния σ на величину A в зависимость (8) был введен безразмерный комплекс (4), а параметр φ_0 заменен на среднее газосодержание слоя $\varphi_{\text{г}}$.

$$A = b_0 \left(\frac{\varphi_{\text{г}}}{1 - \varphi_{\text{г}}}\right)^{b_1} \left(\frac{\Delta P_{\text{ГЖ}} \cdot h_0}{W_{\text{г}} \cdot \mu_{\text{г}}}\right)^{b_2} \left(\frac{\sigma}{\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot h_0^2}\right)^{b_3} \quad (9)$$

Значения коэффициентов в (9) были найдены методом множественной корреляции данных по ректификации бинарных смесей сначала для колонн с провальными тарелками, так как для них можно было широко изменять физические свойства газа и жидкостей [10].

$$b_0 = 0,0143; \quad b_1 = 1,34 \pm 0,065; \\ b_2 = 0,3 \pm 0,042; \quad b_3 = 0,56 \pm 0,036.$$

Зависимость (9) хорошо описывает ректификацию тройных смесей и испарительное охлаждение жидкостей, что видно из рисунка 5.

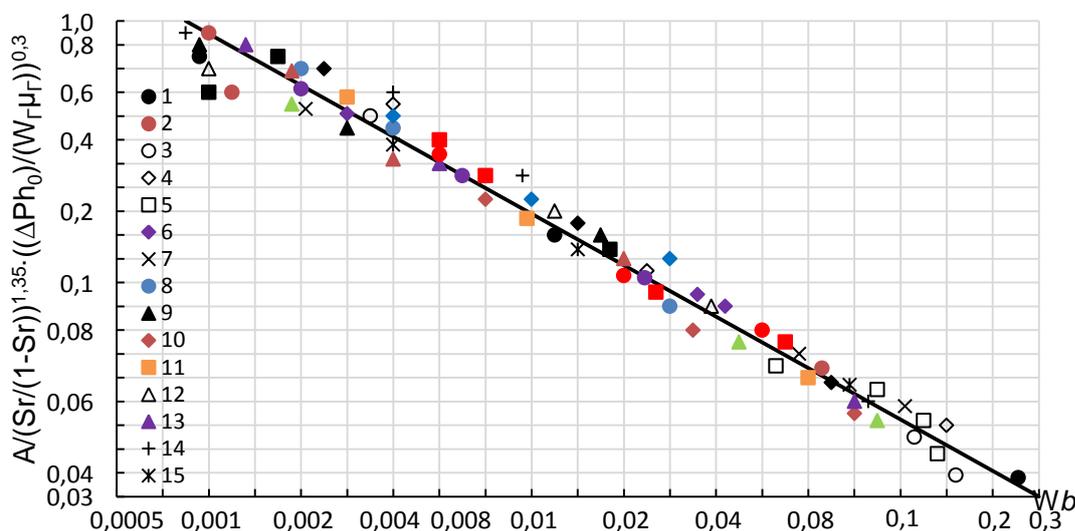


Рис. 5. Корреляция данных по поверхности контакта фаз

В колоннах с колпачковыми и клапанными тарелками поверхность контакта фаз измеряли химическим методом. В этом случае из-за ограниченного набора химических систем невозможно было широко изменять их физические свойства, в первую очередь по-

верхностное натяжение жидкости. В связи с этим показатель степени при числе Вебера приняли равным 0,6. Было установлено, что поверхность зависит от размера клапана, поэтому в уравнение (9) для клапанных тарелок ввели сомножитель $\Gamma_{\text{кл}}$.

$$\Gamma_{\text{кл}} = \left(\frac{0,0025}{d_{\text{кл}}^2} \right)^{0,625}, \quad (10)$$

где $d_{\text{кл}}$ – диаметр клапана.

В таблице 3 представлены результаты статистической обработки данных по уравнению (9).

Таблица 3. Результаты статистической обработки данных по уравнению (9)

Тип тарелок	Процесс	Значения коэффициентов и показателей степени					Общий коэффициент корреляции	Критерий значимости		
		b_0	b_1	b_2	b_3	$\Gamma_{\text{кл}}$		t_1	t_2	t_3
Провальные	ректификация	0,0143	$1,34 \pm 0,065$	$0,3 \pm 0,042$	$0,56 \pm 0,036$	1	0,97	20,7	7,12	15,37
Провальные	абсорбция	30,4	$0,653 \pm 0,085$	$-0,255 \pm 0,035$	0,6	1	0,985	7,7	7,2	-
С капсульными колпачками	абсорбция	8,77	$0,396 \pm 0,18$	$-0,14 \pm 0,053$	0,6	1	0,937	2,1	26	-
Клапанные	абсорбция	10,0	$0,860 \pm 0,044$	$0,220 \pm 0,058$	$0,6 \pm 0,05$	$\Gamma_{\text{кл}}$	0,940	19,3	3,8	11,17

Зависимость (9) применима и при расчете аппаратов промышленных размеров. На рисунке 6 показано влияние диаметра ко-

лонны $d_{\text{к}}$ на величину удельной межфазной поверхности контакта.

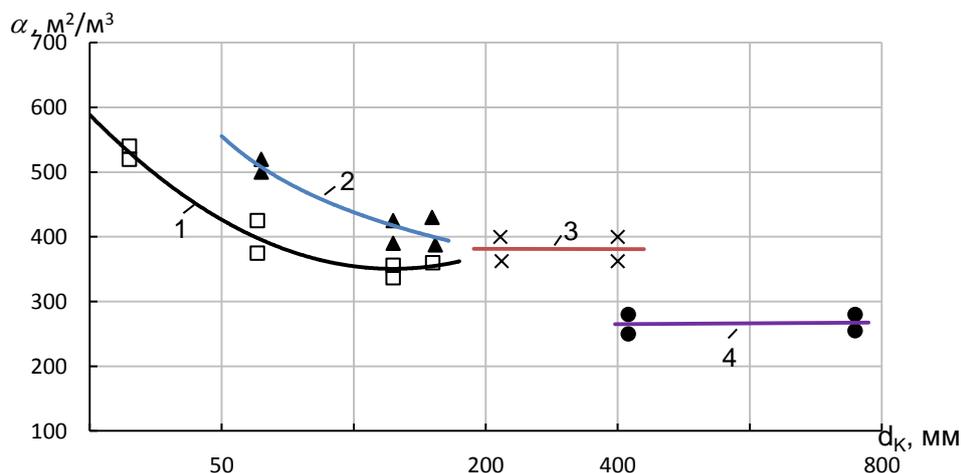


Рис. 6. Влияние диаметра колонны на величину удельной поверхности контакта: 1, 2 – тарелки провальные; 3, 4 – тарелки клапанные

Видно, что удельная поверхность зависит от размера колонны только при $d_{\text{к}} \leq 150$ мм. Дальнейшее увеличение диаметра не сказывается на значении поверхности контакта фаз. Это говорит о том, что зависимости, полученные по уравнению (9), применимы для расчета поверхности в колоннах диаметром более 150 мм.

В качестве характерного линейного размера при обобщении опытных данных по тепло- и массообмену в барботажных слоях можно использовать средний поверхностно-объемный диаметр пузырьков газа (пара)

$$d_{\text{п}} = \frac{6 \cdot \varphi_{\text{г}} \cdot h_0}{A(1 - \varphi_{\text{г}})} \quad (11).$$

Библиографический список

1. 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. Иркутск, 1975. С. 19–32.
2. Ульянов Б.А., Родионов А.И., Янчуковская Е.В. Структура двухфазных слоев и величи-

на межфазной поверхности на контактных тарелках ректификационных и абсорбционных колонн // Теоретические основы химических технологий. 1982. Т. 16. № 4. С. 491–498.

3. Долгова А.Н., Лаптева Е.А. Определение эффективности массообменных тарелок колонных аппаратов с учетом неравномерности распределения фаз // Нефтегазовое дело. 2013.

№ 6. С. 283–309. [Электронный ресурс]. URL: <http://ogbus.ru/article/view/opredelenie-effektivnosti-massoobmennyykh-tarelok-kolonnnykh-apparatov-s-uchetom-neravnomernosti-raspredeleniya-faz> (28.09.2020).

4. Полянский А.В., Блиничев В.Н., Чагин О.В. Критерии оценки эффективности работы ректификационных колонн // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2016. Т. 59. № 1. С. 3–8.

5. Семенов И.А., Ульянов Б.А., Кулов Н.Н. Взаимодействие между паром и жидкостью с учетом неэквимолярности процесса массообмена // Теоретические основы химических технологий. 2015. Т. 49. № 6. С. 609–616.

6. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Институт компьютерных исследований, 2016. 708 с.

7. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2007. 500 с.

8. Лаптев А.Г., Лаптева Е.А. Модель тепло- и массоотдачи в шероховатых и орошаемых каналах // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 4. С. 453–458.

9. Щелкунов Б.И., Фереферов М.Ю. Гидравлическое сопротивление тарелок провального типа // Гидродинамика и явления переноса в двухфазных дисперсных системах: сб. статей. 1980. С. 72–77.

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: сб. статей. 1980. С. 43–47.

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

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

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

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