

УДК 66.021.3

## О ВЛИЯНИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В СЛОЕ ОРОШАЕМОЙ НАСАДКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАССООБМЕНА В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ

Москалик В. М., Карпюк Л. В.

## INFLUENCE OF THE HYDRODYNAMIC SITUATION IN IRRIGATING PACKING LAYER ON THE EFFICIENCY OF THE MASS TRANSFER IN THE GAS PHASE.

Moskalyk V. M., Karpyuk L. V.

*Проведены исследования эффективности массоотдачи в газовой фазе в слое орошаемой насадки при пульсирующей подаче жидкости. В результате исследования установлено, что высоты единиц переноса в газовой фазе в зависимости от средней плотности орошения за период подачи жидкости не обнаруживают скачкообразного изменения в условиях пленочного режима, режима подвисяния и режима инверсии фаз, однако последовательно уменьшаются с возрастанием скорости газа в колонне. Высоты единиц переноса в газовой фазе при периодическом превышении предельных нагрузок по жидкости и газу в точках подвисяния и инверсии фаз на 17-20 % остаются постоянными и практически не отличаются по величине стационарного орошения.*

**Ключевые слова:** массоотдача, газовая фаза, пульсирующая подача жидкости, высота единицы переноса.

**Введение.** Массоотдачу в газовой фазе в слое орошаемой насадки изучают при возгонке твердых тел, при испарении чистых жидкостей и при абсорбции хорошо растворимых газов [1].

Для инженерного расчета коэффициента массоотдачи в газовой фазе  $\beta_G$  в слое орошаемой кольцевой насадки, засыпанной внавал, рекомендуют [2-4], предложенную Жаворонковым, Гильденблатом и Раммом [5], критериальную зависимость

$$\text{Sh}_G = 0,407 \text{Re}_G^{0,655} \text{Sc}_G^{1/3}, \quad (1)$$

где  $\text{Sh}_G = \beta_G d_3 / D_G$  – число Шервуда для газовой фазы;  $\text{Re}_G = W_G d_3 / \nu_G$  – число Рейнольдса для газовой фазы;  $\text{Sc}_G = \nu_G / D_G$  – число Шмидта для газовой фазы;  $d_3$  – эквивалентный диаметр насадки, м;  $D_G$  – коэффициент молекулярной диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $W_G$  –

приведенная скорость газа, м/с;  $\nu_G$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

Уравнение (1) получено путем возгонки твердых тел в отсутствие орошения и поэтому не учитывает реальной гидродинамической обстановки в слое орошаемой насадки. С достаточной для инженерных расчетов точностью уравнение может быть использовано для расчета  $\beta_G$  при пленочном режиме.

Onda R. с сотр. [6] рассчитали  $\beta_G$  на основе своих опытов и данных других исследователей и предложили обобщенную зависимость, которая для колец, засыпанных внавал, имеет вид

$$\text{Sh}_G = 0,0142 \text{Re}_G^{0,8} \text{Ga}_G^{0,16} \text{Sc}_G^{1/3}. \quad (2)$$

где  $\text{Ga}_G = g \cdot d_3^3 / \nu_G$  – число Галилея для газовой фазы.

Уравнение (2) получено при абсорбции хорошо растворимого аммиака водой.

**Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций.** Стремление к увеличению диапазона работы насадочного аппарата, особенно в процессах абсорбции, когда гидравлическое сопротивление ( $\Delta P$ ) слоя насадки существенно не сказывается на стоимости продукции, принуждает исследователей к изучению массопередачи в активных гидродинамических режимах подвисяния и инверсии фаз.

При противоточном движении газа и жидкости в слое насадки, в зависимости от относительного движения скоростей потоков, различают три гидродинамических режима: пленочный режим, режим подвисяния и режим инверсии фаз [7].

Известно [1], что при смене гидродинамического режима от пленочного режима до режима инверсии фаз коэффициенты массоотдачи последовательно увеличиваются и

становятся пропорциональными скорости потока в степени от 0,3 до 1,0.

На поверхности раздела фаз в результате трения газа и жидкости возникают касательные напряжения. При пленочном режиме работы насадочной колонны, до захвата жидкости газом, газовый поток очень слабо влияет на параметры пленочного течения. В режимах подвисяния и инверсии фаз скорость газа вызывает торможение стекающей жидкости. Следствием этого является увеличение активной поверхности фаз [8], что, в свою очередь, способствует интенсификации массообмена [7, 9, 10].

Смену гидродинамических режимов можно проследить на зависимости  $\lg(\Delta P) = f(\lg W_G)$ , Однако четкое определение на ней точек подвисяния и инверсии фаз затруднительно, знание которых необходимо при проектировании насадочного аппарата.

Обширный экспериментальный материал, полученный при изучении массоотдачи в жидкой фазе [11] и обработанный методом асимптотических координат [12], сформировал универсальную зависимость, где отчетливо наблюдается, что пленочный режим существует до  $W_G/W_{Ginv}=0,6$ , а режиму захлебывания соответствует единственная точка, когда  $W_G/W_{Ginv}=1,0$ , где  $W_{Ginv}$  – скорость инверсии фаз. Четкость следования коэффициента массоотдачи в жидкой фазе гидродинамическому режиму указывает на скачкообразный характер изменения эффективности массоотдачи в жидкой фазе.

По аналогии с массоотдачей в жидкой фазе, можно было ожидать, что массоотдача в газовой фазе также должна скачкообразно отслеживать смену гидродинамических режимов. Единого мнения по данному вопросу не существует. Одни исследователи [13, 14] утверждают о переломном характере изменения кривой эффективности в газовой фазе, другие [9, 15] этого не наблюдают.

**Описание опытной установки и методики проведения эксперимента.** Для проверки указанного противоречия проведены исследования массоотдачи в газовой фазе с наложением низкочастотных пульсаций жидкости на постоянно подаваемый поток жидкости в противоточную насадочную колонну.

Десорбцию аммиака из воды в поток воздуха проводили на экспериментальной установке, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1.

Основными аппаратами установки являлись десорбер 1 и абсорбер 2. В абсорбере 2 насыщали дистиллированную воду аммиаком, который из баллона 3 аммиака редуцировался игольчатым вентилем Гоффера 4 с контролем постоянства расхода по ротаметру 5. По дистиллированной воде был организован замкнутый контур, включающий абсорбер 2, систему пульсирующей подачи жидкости, состоящую из ротаметра 6, вентиля 7 и 8

и трехходового крана 9, десорбер 1, промежуточную емкость 10, насос 11, гидрозатвор 12, вентиль 13 с регулировкой количества дистиллированной воды по ротаметру 14. Корпус десорбера 1 был изготовлен из стеклянной царги внутренним диаметром 105 мм. Воздух в десорбер 1 подавали компрессором (не показан), количество которого регулировали вентилями 15 по ротаметрам 16. Испытывали керамические кольца Рашига размером 15x15x3 мм, засыпанные внавал на рабочую высоту  $H=800$  мм.

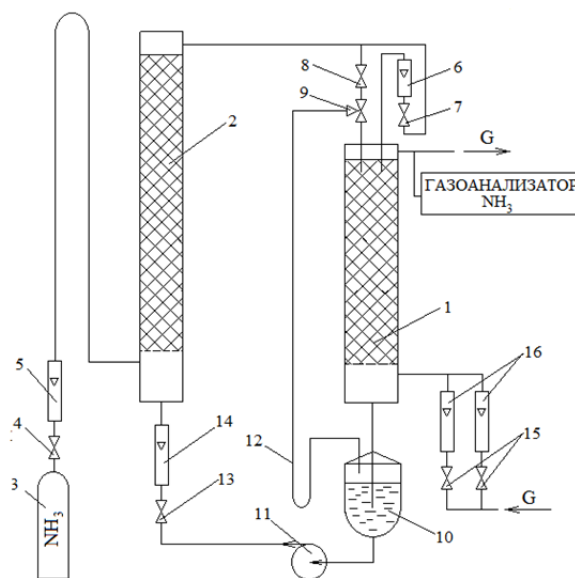


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Обозначение позиций см. в тексте

Эффективность массообмена рассчитывали по уравнениям

$$h_{OG} = \frac{H}{N_{OG}} \quad (3)$$

$$N_{OG} = \frac{p_2 - p_1}{\Delta p_{cp}} \quad (4)$$

$$\Delta p_{cp} = \frac{(p_2^* - p_1) - (p_1^* - p_2)}{\ln \frac{(p_2^* - p_1)}{(p_1^* - p_2)}} \quad (5)$$

где  $h_{OG}$  – общая высота единицы переноса, выраженная через газовую фазу;  $N_{OG}$  – общее число единиц переноса, выраженное через газовую фазу;  $p_1, p_2$  – парциальные давления аммиака в воздухе на входе и выходе из насадки, мм рт. ст.;  $\Delta p_{cp}$  – средняя движущая сила процесса десорбции, мм рт. ст.;  $p_1^*$  и  $p_2^*$  – равновесные парциальные давления аммиака, мм рт. ст.

Концентрацию аммиака в воде находили титрованием после отбора пипеткой, а концентрацию аммиака в воздухе непрерывно измеряли ленточным фотоколориметром.

Окончательно высоту единицы переноса в газовой фазе  $h_G$  с поправкой на различие в коэффициентах диффузии аммиака  $D_{NH_3}$  и диоксида углерода  $D_{CO_2}$  рассчитывали по уравнению

$$h_G = h_{OG} - \frac{m \cdot L}{G} h_L \left( \frac{D_{NH_3}}{D_{CO_2}} \right)^{0,5} \quad (6)$$

где  $m$  – константа фазового равновесия;  $L$  – расход воды;  $G$  – расход воздуха;  $h_L$  – высота единицы переноса в воде, полученная при десорбции диоксида углерода в аналогичных гидродинамических условиях.

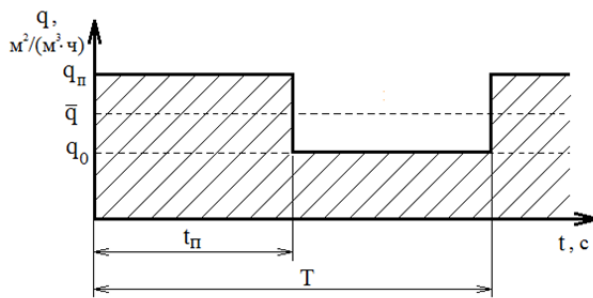


Рис. 2. Схема организации орошения слоя насадки

Система подачи жидкости в десорбер 1 (см. рис. 1) представляла собой генератор прямоугольных импульсов. Схема орошения слоя насадки представлена на рис. 2. Часть жидкости подавали в десорбер 1 непрерывно с плотностью орошения  $q_0$ . Другой частью жидкости создавали пульсирующее орошение  $q_n$  в течение времени  $t_n$  с периодом  $T$  с помощью трехходового крана 9

поворотом его маховика. «Лишняя» жидкость в течение времени  $(T-t_n)$  отводилась через гидрозатвор 12 в емкость 10. В среднем плотность орошения насадки составляла величину  $\bar{q}$ . Отсчет времени производился по секундомеру.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В таблице приведены средняя плотность орошения  $\bar{q}$ , плотность орошения при постоянной подаче жидкости  $q_0$ , плотность орошения при пульсирующей подаче  $q_n$  и соответствующие плотностям орошения относительные скорости газа  $W_G/W_{Ginv}$ . Предельные нагрузки по газу  $W_{Ginv}$  и жидкости  $W_L$  оценивали по уравнению Бейна и Хоугена [16]. Если сравнить относительные скорости газа  $W_G/W_{Ginv}$  при  $q_0$  и  $q_n$ , то нетрудно заметить, что превышение  $W_G/W_{Ginv}$  при  $q_n$  по сравнению с  $q_0$  составляет 17-20%. Указанное обстоятельство визуально можно было наблюдать через стеклянную стенку десорбера. При  $q_0$  в течение времени  $T-t_n$  жидкость непрерывно стекала по насадке с относительно малым на нее влиянием восходящего потока воздуха. Однако при  $q_n$  в течение  $t_n$  происходило образование в слое насадки газожидкостных поршней, которые по мере движения вниз десорбера размывались, увеличиваясь в размерах по высоте. Визуально четкость периодического образования и исчезновения газожидкостных поршней в слое насадки усиливались по мере приближения к предельным нагрузкам по газу и жидкости, а также при уменьшении  $q_0$  и  $t_n/T$ . В результате можно констатировать, что пульсирующей подачей жидкости было достигнуто периодическое превышение предельных нагрузок по жидкости и газу в точках подвисяния и инверсии фаз на 17-20%.

Таблица

**Взаимосвязь между средней плотностью орошения  $\bar{q}$ , плотностью орошения при постоянной подаче жидкости  $q_0$  и плотностью орошения при пульсирующей подаче жидкости  $q_n$  и соответствующие плотностям орошения относительными скоростями газа  $W_G/W_{Ginv}$**

№ пп	$\bar{q}$ , м³/(м²·ч)	$\frac{W_G}{W_{Ginv}}$	$q_0$ , м³/(м²·ч)	$\frac{W_G}{W_{Ginv}}$	$q_n$ , м³/(м²·ч)	$\frac{W_G}{W_{Ginv}}$
1	2	3	4	5	6	7
1.	16,07	0,35	12,86	0,321	19,29	0,377
2.	16,07	0,52	12,86	0,478	19,29	0,561
3.	16,07	0,543	12,86	0,499	19,29	0,586
4.	16,07	0,726	12,86	0,667	19,29	0,783
5.	16,07	0,909	12,86	0,835	19,29	0,981
6.	16,07	1,0	12,86	0,918	19,29	1,079
7.	20,45	0,20	16,36	0,184	24,54	0,216
8.	20,45	0,30	16,36	0,276	24,54	0,324
9.	20,45	0,619	16,36	0,570	24,54	0,669
10.	20,45	0,790	16,36	0,727	24,54	0,854
11.	20,45	1,0	16,36	0,920	24,54	1,081
12.	24,83	0,250	19,86	0,223	29,74	0,269
13.	24,83	0,749	19,86	0,668	29,74	0,806
14.	24,83	0,874	19,86	0,779	29,74	0,940
15.	24,83	1,0	19,86	0,891	29,74	1,046

Подтверждением сказанного на рис. 3 представлена зависимость  $\Delta P/H = f(t)$ , полученная при непрерывном измерении во времени  $t$  гидравлического сопротивления  $\Delta P/H$  слоя орошаемой насадки с помощью специально разработанного прибора в зависимости от различных относительных скоростей газа  $W_G/W_{Ginv}$ . Синусоидальное изменение  $\Delta P/H$  во времени  $t$  согласуется с гидродинамической обстановкой периодически орошаемой насадки.

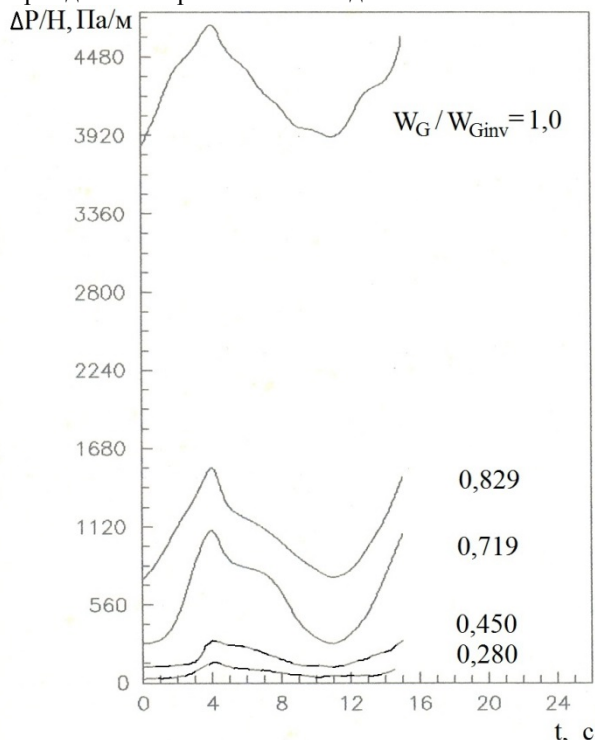


Рис. 3. Изменение гидравлического сопротивления  $\Delta P/H$  слоя насадки Рашига размером 15x15x3 мм во времени  $t$  при различных  $W_G/W_{Ginv}$ :

$$\bar{q} = 16,07 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), q_0 = 0, T=11 \text{ с}, t_n/T=0,38$$

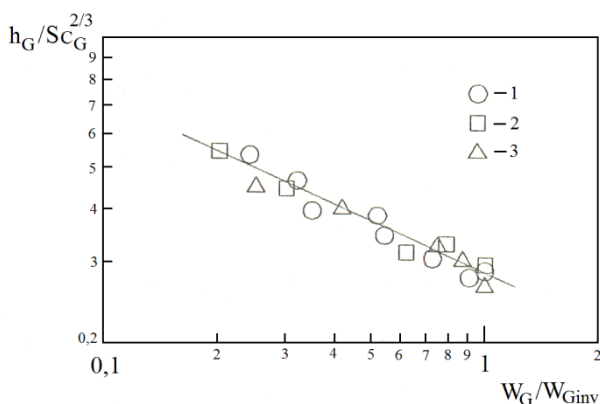


Рис. 4. Зависимость  $h_G/Sc_G^{2/3}$  от  $W_G/W_{Ginv}$  для колец Рашига размером 15x15x3 мм при  $q_0 = 0,8\bar{q}$ ,  $T=10$  с и  $t_n/T=0,8$ : 1 –  $\bar{q} = 16,07 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; 2 – 20,45; 3 – 24,83.

Сплошная линия соответствует уравнению при стационарном орошении [9]

На рис. 4 представлена корреляция экспериментальных данных, полученных в результате десорбции аммиака из воды в воздух на кольцах Рашига размером 15x15x3 мм при пульсирующей подаче жидкости с различными значениями средних плотностей орошения с учетом доли сопротивления массопередаче со стороны жидкой фазы [17]. Здесь же нанесена прямая линия, полученная в работе [9] в ходе стационарного орошения.

**Выводы.** В заключение по результатам анализа данных, полученных при изучении массоотдачи в газовой фазе в слое орошаемой насадки при наложении пульсирующей подачи жидкости, отметим. Во-первых, высоты единиц переноса в газовой фазе в зависимости от средней плотности орошения  $\bar{q}$  не обнаруживают скачкообразного изменения в условиях пленочного режима, режима подвисяния и режима инверсии фаз, однако последовательно уменьшаются с возрастанием скорости газа в колонне. Во-вторых, высоты единиц переноса в газовой фазе при периодическом превышении предельных нагрузок по жидкости и газу в точках подвисяния и инверсии фаз на 17-20 % практически остаются постоянными. В-третьих, высоты единиц переноса в газовой фазе при пульсирующей подаче жидкости и стационарном орошении практически совпадают и могут быть рассчитаны по одному и тому же эмпирическому уравнению, рекомендуемому в работе [9].

### Литература

1. Рамм В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
2. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник / А. Г. Касаткин. – 12-е изд., стереотип. дораб. – М: Альянс, 2005. – 750 с.
3. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 575 с.
4. Плановский А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии: учебник для вузов / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Химия, 1987. – 496 с.
5. Жаворонков Н. М. Исследование массопередачи к однофазному потоку в насадочных колоннах / Н. М. Жаворонков, И. А. Гильденблат, В.М. Рамм // Журн. прикл. химии. – 1960. – Т. 33. – № 8. – С. 1790-1800.
6. Onda K. Gas-side transfer coefficients in packed tower / K. Onda, E. Sada, M. Saito // Kagaku Kogaku. – 1961. – V. 25. – № 11. – P. 820-829.
7. Кафаров В. В. Основы массопередачи / В. В. Кафаров. – М.: Высш. школа, 1979. – 439 с.
8. Teutsch Theo. Zur Absorption in Füllkörperschüttungen / Theo Teutsch // Chemie Ingenieur Technik. 1965. – Bd. 37. – N. 12. – S. 1224-1229.
9. Ильиных А. А. Массообмен в орошаемой насадке в режимах подвисяния и эмульгирования / А. А. Ильиных, З. Н. Мемедяев, Н. Н. Кулов // Теор.

- основы хим. технол. – 1989. – Т. 23. – № 5. – С. 569-574.
10. Кафаров В. В. Явление скачкообразного увеличения тепло- и массообмена между газовой и жидкой фазами в аппаратах с насадкой. / В. В. Кафаров, Л. И. Бляхман, А. Н. Плановский // Теор. основы хим. технол. – 1976. – Т. 10. – № 3. – С. 331-339.
  11. Мемедляев З. Н. Массоотдача в орошаемой насадке в режимах подвисяния и инверсии фаз / З. Н. Мемедляев, Н. Н. Кулов, А. А. Ильных, В. М. Москалик. // Теор. основы хим. технол. – 1994. – Т. 28. – № 1. – С. 3-7.
  12. Дильман В. В. Методы модельных уравнений и аналогий / В. В. Дильман, А. Д. Полянин. – М.: Химия, 1988. – 304 с.
  13. Кафаров В. В. Оптимальный режим массообмена в насадочных колоннах / В. В. Кафаров, А. Г. Касаткин, Н. А. Пришедько. // Хим. пром-сть. – 1949 – № 6. – С. 171-177.
  14. Houston R. W. Absorption in Packed Towers. Effect of Molecular Diffusing on Gas Film Coefficient. / R.W. Houston, Charles A. Walker. // Ind. Eng. Chem. – 1950. – V. 42 (6). – P. 1105-1112.
  15. Тычинин Н. Н. Исследование влияния режима работы на эффективность насадочных ректификационных колонн / Н. Н. Тычинин, В. П. Толстых, Е. Д. Вергузаев. // Теор. основы хим. технол. – 1976. – Т. 7. – № 6. – С. 916-918.
  16. Bain W. Flooding Velocities in Packed Columns / W. Bain, O.A. Hougen // Trans. Am. Inst. Chem. Eng. – 1944. – V.40. – No 1. – P. 29-49.
  17. Адонин Ю. А. Исследование массообмена в трубках с орошаемыми стенками при противотоке газа. / Ю. А. Адонин, В. М. Олевский, Д. М. Попов // Хим. пром-сть. – 1966. – № 11. – С. 859-864.
  11. Memedlyayev Z.N. Kulov N.N., Ilinyih A.A., Moskalik V.M. Massootdacha v oroshaemoy nasadke v rezhimah podvisaniya i inversii faz. Teor. osnovyi khim. tehnol. 1994, V. 28. no. 1. pp. 3-7.
  12. Dilman V.V., Polyinin A.D. Metodyi modelnyih uravneniy i analogiy. Khimiya, Moscow, 1988, 304 p.
  13. Kafarov V.V., Kasatkin A.G., Prishedko N.A.. Optimalnyiy rezhim massoobmena v nasadochnyih kolonnah. Khim. prom-st. 1949, no. 6, pp. 171-177.
  14. Houston R.W., Walker Charles A. Absorption in Packed Towers. Effect of Molecular Diffusing on Gas Film Coefficient. Ind. Eng. Chem. 1950, V. 42, (6), pp. 1105-1112.
  15. Tyichinin N.N., Tolstyih V.P., Vertuzayev E.D. Issledovanie vliyaniya rezhima raboty na effektivnost nasadochnyih rektifikatsionnyih kolonn. Teor. osnovyi khim. tehnol. 1976, V. 7, no. 6., pp. 916-918.
  16. Bain W., Hougen O.A. Flooding Velocities in Packed Columns. Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 1944, V.40, no. 1, pp. 29-49.

**Москалик В. М., Карпюк Л. В. Про вплив гідродинамічної обстановки в шарі зрошуваної насадки на ефективність масообміну в газовій фазі**

*Проведено дослідження ефективності масовіддачі у газовій фазі в шарі зрошуваної насадки при пульсуючій подачі рідини. У результаті дослідження встановлено, що висоти одиниць переносу у газовій фазі в залежності від середньої густини зрошення за період подачі рідини не виявляють стрибкоподібної зміни в умовах плівкового режиму, режиму підвищування та режиму інверсії фаз, проте послідовно зменшуються зі збільшенням швидкості газу в колоні. Висоти одиниць переносу у газовій фазі при періодичному збільшенні граничних навантажень по рідині та газу в точках підвищування і інверсії фаз на 17-20 % залишаються незмінними та практично не відрізняються за величиною стаціонарного зрошення.*

**Ключові слова:** масовіддача, газова фаза, пульсуюча подача рідини, висота одиниці переносу.

**Moskalyk V. M., Karpyuk L. V. Influence of the hydrodynamic situation in irrigating packing layer on the efficiency of the mass transfer in the gas phase.**

*Researches of the mass transfer efficiency in a gas phase in irrigating packing layer at the pulsing liquid supply are carried out. As a result of a research it is established that the heights of transport units in the gas phase, depending on the average density of irrigation over the period of liquid supply do not show a discontinuous change under conditions of film regime, a regime of suspension and the phase inversion regime, however, they decrease successively with increasing gas velocity in the column. The heights of transport units in the gas phase with periodic exceeding of the maximum loads in liquid and gas at the points of suspension and inversion of phases by 17-20% remain constant and practically do not differ in the value of stationary irrigation.*

**Keywords:** a mass transfer, a gas phase, the pulsing liquid supply, height of transport units .

**Москалик Валерій Михайлович**, к.т.н., доцент кафедри машинознавства та обладнання промислових підприємств СХУ імені В. Даля.

**Карпюк Людмила Вікторівна**, старший викладач кафедри машинознавства та обладнання промислових підприємств СХУ імені В. Даля.

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Суворін А.В.**

Стаття подана 2.05.2018

**References**

1. Ramm V.M. Absorbtsiya gazov. Khimiya, Moscow, 1976. 656 p.
2. Kasatkin A.G. Osnovnyie protsessyi i apparaty himicheskoy tehnologii: uchebnik. Alyans, Moscow, 2005. 750 p.
3. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. Primeryi i zadachi po kursu protsessov i apparatov himicheskoy tehnologii: uchebnoe posobie dlya vuzov. Khimiya, Leningrad, 1987. 575 p.
4. Planovskiy A.N., Nikolaev P.I. Protsessyi i apparaty himicheskoy i neftehicheskoy tehnologii: uchebnik dlya vuzov. Khimiya, Moscow, 1987. 496 p.
5. Zhavoronkov N.M., Gildenblat I.A., Ramm V.M.. Issledovanie massoperedachi k odnofaznomu potoku v nasadochnyih kolonnah. Zhurn. prikl. Khimii, 1960, V. 33, no. 8, pp. 1790-1800.
6. Onda K. Gas-side transfer coefficients in packed tower / K. Onda, E. Sada, M. Saito // Kagaku Kogaku, 1961, V. 25, no. 11, pp. 820-829.
7. Kafarov V.V. Osnovyi massoperedachi. Vyssh. shkola, Moscow, 1979. 439 p.
8. Teutsch Theo. Zur Absorption in Füllkörperschüttungen. Theo Teutsch. Chemie Ingenieur Technik. 1965, V. 37, no. 12, pp. 1224-1229.
9. Ilinyih A.A., Memedlyayev Z.N., Kulov N.N. Massoobmen v oroshaemoy nasadke v rezhimah podvisaniya i emulgirovaniya. Teor. osnovyi khim. tehnol. 1989, V. 23, no. 5. pp. 569-574.
10. Kafarov V.V., Blyahman L.I., Planovskiy A.N.. Yavlenie skachkoobraznogo uvelicheniya teplo- i massoobmena mezhdu gazovoy i zhidkoy fazami v apparatah s nasadkoy. Teor. osnovyi khim. tehnol. 1976, V. 10, no. 3. – S. 331-339.