

## Определение эффективности тарельчатых массообменных аппаратов, применяемых в нефтехимическом производстве

Александр Б. Емельянов<sup>1</sup> okipr-mip@mail.ru  
Максим В. Мальцев<sup>1</sup> max\_proekt@mail.ru  
Виктор Б. Попов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

**Реферат.** Разработка эффективных схем разделения продуктов переработки нефти является актуальной задачей для современной промышленности. Чистые и сверхчистые материалы основное требование современных производств. Осуществление современных технологических процессов в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности требует высокоэффективные аппараты, к которым предъявляются высокие требования по эргономичности, экономичности, технологичности и надежности. Эффективность работы массообменных аппаратов зависит и от условий проведения технологического процесса, физических свойств контактных фаз, учитывая природу и количество механических примесей, циркулирующих в этой системе. Поэтому оценивание эффективности работы массообменных аппаратов с различными типами контактных устройств, с целью выявления их оптимальных технологических и конструктивных параметров – сложная практическая задача. Применение математического комплекса для оценки эффективности работы массообменных аппаратов позволяет подобрать оптимальные режимы работы и конструкцию колонного тарельчатого аппарата необходимого для эффективного разделения смеси. Представлены зависимости коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и КПД ситчатой тарелки по Мерффри в зависимости от градиента при различных скоростях газа в колонном аппарате для ситчатой тарелки. Увеличение скорости газа уменьшает влияние неравномерности распределения жидкости и газа (пара) на коэффициент массоотдачи в газовой фазе, а при скорости газа 1,0 м/с и выше – отсутствует. Снижение на 40% коэффициента массоотдачи в газовой фазе наблюдается при скорости 0,2 м/с, а при 1,0 м/с – на 1%. Увеличение градиента увеличивает это влияние. Снижение эффективности тарельчатых массообменных аппаратов на 5–35%, применяемых в нефтехимическом производстве, обусловлено градиентом уровня жидкости, а также типом контактного устройства и скоростью газа.

**Ключевые слова:** продукты переработки нефти, массообменные аппараты, эффективность, режимы работы

## Determination of the efficiency of the plate-type mass transfer apparatus used in petrochemical production

Aleksandr B. Emel'janov<sup>1</sup> okipr-mip@mail.ru  
Maxim V. Maltsev<sup>1</sup> max\_proekt@mail.ru  
Viktor B. Popov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

**Summary.** The development of effective separation schemes for oil refining products is an urgent task for modern industry. Clean and super pure materials are the main requirement of modern productions. The implementation of modern technological processes in the petrochemical and oil refining industry requires highly efficient devices, to which high demands are placed on ergonomics, economy, manufacturability and reliability. The effectiveness of the mass-exchange apparatus depends on the conditions of the technological process, the physical properties of the contact phases, taking into account the nature and amount of mechanical impurities circulating in this system. Therefore, the evaluation of the efficiency of mass-exchange devices with different types of contact devices, in order to identify their optimal technological and design parameters, is quite a difficult practical task. The application of a mathematical complex for the evaluation of the efficiency of mass exchanging apparatuses makes it possible to select the optimal operating modes and the design of a columnar disk apparatus necessary for efficient separation of the mixture. Dependences of the mass transfer coefficients in the gas phase and the efficiency of the Murphy sieve plate are presented, depending on the gradient at different gas velocities in a columnar apparatus for a sieve tray. An increase in the gas velocity reduces the effect of the uneven distribution of the liquid and gas (vapor) on the mass transfer coefficient in the gas phase, and at a gas velocity of 1 m/s and higher, there is no. A 40% reduction in the mass transfer coefficient in the gas phase is observed at a speed of 0.2 m/s, and at 1 m/s - by 1%. Increasing the gradient increases this effect. The decrease in the efficiency of the plate-type mass transfer apparatus by 5–35% used in petrochemical production is due to the gradient of the liquid level, as well as the type of contact device and the gas velocity

**Keywords:** products of oil refining, mass transfer devices, efficiency, operating modes

### Введение

Высокий спрос на продукты нефтепереработки за последние годы привел к интенсивному росту нефтеперерабатывающей промышленности. В процессе переработки нефти получают продукты нефтепереработки, которые играют огромную роль в развитии всех отраслей промышленности.

Решением этих вопросов является модернизация существующих и разработка наиболее эффективных схем разделения исходной смеси на составляющие, создание новых перспективных типов контактных устройств, действующего технологического оборудования и промышленных технологий.

Для цитирования

Фамилия И.О., Фамилия И.О., Фамилия И.О., Фамилия И.О. Определение эффективности тарельчатых массообменных аппаратов, применяемых в нефтехимическом производстве // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 2. С. 176–179. doi:10.20914/2310-1202-2017-2-176-179

For citation

Lastname F.S., Lastname F.S., Lastname A.S., Lastname F.S. Determination of the efficiency of the plate-type mass transfer apparatus used in petrochemical production. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 2. pp. 176–179. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-2-176-179

Повышение требований к надежности и эффективности работы массообменных аппаратов, снижение их металлоемкости и габаритов приводит к постоянному усовершенствованию конструкций контактных устройств. Эффективность работы ректификационных колонн влияет на качество производимых продуктов переработки и технико-экономические показатели эксплуатации установок и заводов в целом [1–3].

Чистые и особо чистые материалы основное требование современной промышленности. В результате этого переработка материалов становится еще более важной, сложной и дорогостоящей, а технология по разделению веществ и очистке от примесей требует большего внимания.

Осуществление современных технологических процессов в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности требует высокоэффективные аппараты, к которым предъявляются высокие требования по эргономичности, экономичности, технологичности и надежности [4–8].

Эффективность работы массообменных аппаратов зависит и от условий проведения технологического процесса, физических свойств контактных фаз, учитывая природу и количество механических примесей, циркулирующих в этой системе. Поэтому оценивание эффективности работы массообменных аппаратов с различными типами контактных устройств, с целью выявления их оптимальных технологических и конструктивных параметров – сложная практическая задача.

Применение математического комплекса позволяет подобрать оптимальные режимы работы и конструкцию колонного тарельчатого аппарата необходимого для эффективного разделения смеси.

Общезвестное уравнение математической модели по жидкой фазе для каждой  $i$ -ой секции выглядит следующим образом:

$$u_i \frac{x_{i-1} - x_i}{\Delta l_i} = (ka)_i (x_i - x_i^*), \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (1)$$

где  $x$  – концентрация компонента в жидкой фазе;  $x_i^*$  – равновесная концентрация жидкости к концентрации пара в секции  $x_i^* = f(y_n)$ ,  $\Delta l_i$  – габарит секции в продольном сечении;  $n$  – количество секций;  $u_i$  – средняя скорость движения жидкости в секции, м/с.

Среднюю скорость движения жидкости в секции можно найти, учитывая градиент уровня жидкости, при этом принимая распределение от приемной до сливной планки за линейное.

$$u_i = \frac{L}{\rho_{ж} (h_{ст} + \Delta l_i) \xi_i} \quad (2)$$

где  $L$  – массовый расход жидкости на ситчатой тарелке, кг/с;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$h_{ст}$  – средняя высота статического столба жидкости, м;  $\Delta l_i$  – градиент уровня жидкости в каждой  $i$ -ой ячейке.

Концентрация пара, покидающая  $i$ -ю ячейку, находится по уравнению материального баланса:

$$G_i (y_i - y_n) = (x_{i-1} - x_i). \quad (3)$$

С учетом полного перемешивания пара в межтарельчатом пространстве колонны, уравнение (3) для всего контактного устройства будет иметь следующий вид:

$$G_i (y_k - y_n) = L(x_n - x_k). \quad (4)$$

Профиль концентрации в жидкой фазе по длине массообменного устройства и значение концентраций на выходе –  $(x_k, y_k)$  находятся решением систем уравнений (1–4) с учетом известных значений начальной концентрации в паре и жидкости  $(y_n, x_n)$  на входе ситчатой тарелки.

Из уравнений (1) и (2), учитывая, что  $x^* = y / \bar{m}$  найдем концентрацию в каждой определенной  $i$ -ой ячейке:

$$x_i = \frac{x_i + b \frac{y_n}{\bar{m}} + b \frac{Lx_{i-1}}{G\bar{m}}}{\left[ b\bar{m} + 1 + b \frac{L}{G} \right]}, \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (5)$$

где  $b = \frac{(ka)_i \Delta l_i}{u_i m}$ ,  $\bar{m}$  – коэффициент распределения.

Полученное выражение в явном виде дает возможность определить концентрацию в жидкой фазе по всему пути жидкости на ситчатой тарелке.

По выражениям (6) и (7) найдем эффективность разделения смеси на ситчатой тарелке (КПД по Мерффри):  
в жидкой фазе

$$\eta_x = \frac{x_n - x_k}{x_n - x^*} \quad (6)$$

в паровой фазе

$$\eta_y = \frac{y_k - y_n}{y^* - y_n} \quad (7)$$

Оценим влияние режимов и конструктивных характеристик на процесс разделения смеси с учетом приведенной выше математической модели.

В выделенной секции гидравлическое сопротивление ситчатой тарелки связано с профилем скорости парового (газового) потока в поперечном сечении колонны. Меньшее значение скорости пара будет наблюдаться в секции у приемной планки из-за высокого значения столба жидкости, а максимальная скорость пара в секции у сливной планки прослеживается там, где минимальный столб жидкости. Максимальное значение этих неровностей наблюдается при

большом градиенте уровня жидкости на ситчатой тарелке. Монтаж контактного устройства выполненный с нарушением также может вызывать перераспределение парового потока.

На рисунках 1, 2 представлены зависимости коэффициентов массоотдачи в газовой фазе и КПД ситчатой тарелки по Мерффри в зависимости от градиента при различных скоростях газа в колонном аппарате для ситчатой тарелки. Таким же образом аналогично влияние увеличения градиента уровня жидкости на коэффициент массоотдачи в жидкой фазе.

Из графика, представленного на рисунке 1 для ситчатых тарелок следует, что со снижением скорости газа, увеличивается влияние неравномерности распределения жидкости и пара (газа) на коэффициент массоотдачи в газовой фазе. Увеличение скорости газа уменьшает влияние неравномерности распределения жидкости и газа (пара) на коэффициент массоотдачи в газовой фазе, а при скорости газа 1,0 м/с и выше – отсутствует. Снижение на 40% коэффициента массоотдачи в газовой фазе наблюдается при скорости 0,2 м/с, а при 1,0 м/с – на 1%. Увеличение градиента увеличивает это влияние.

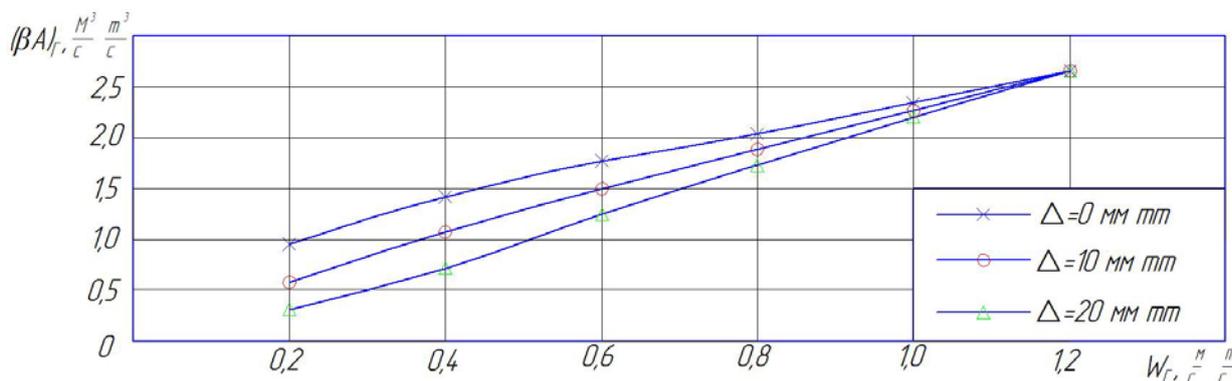


Рисунок 1. Зависимость коэффициента массоотдачи в газовой фазе от градиента уровня жидкости при различных скоростях газа на ситчатой тарелке

Figure 1. Dependence of the mass-transfer coefficient in the gas phase on the liquid-level gradient at various gas velocities on a perforated plate

На рисунке 2 приведена зависимость увеличения градиента уровня жидкости на КПД тарелки по Мерффри для ситчатых тарелок. Из графика следует, что уменьшение скорости газа от 1,0 до 0,2 м/с снижает КПД тарелки

по Мерффри на 1–15%, а увеличение градиента (от 10 до 20 мм) увеличивает это влияние. При скорости газа выше чем 1,0 м/с отсутствует влияние неравномерности распределения жидкости и пара (газа) [3].

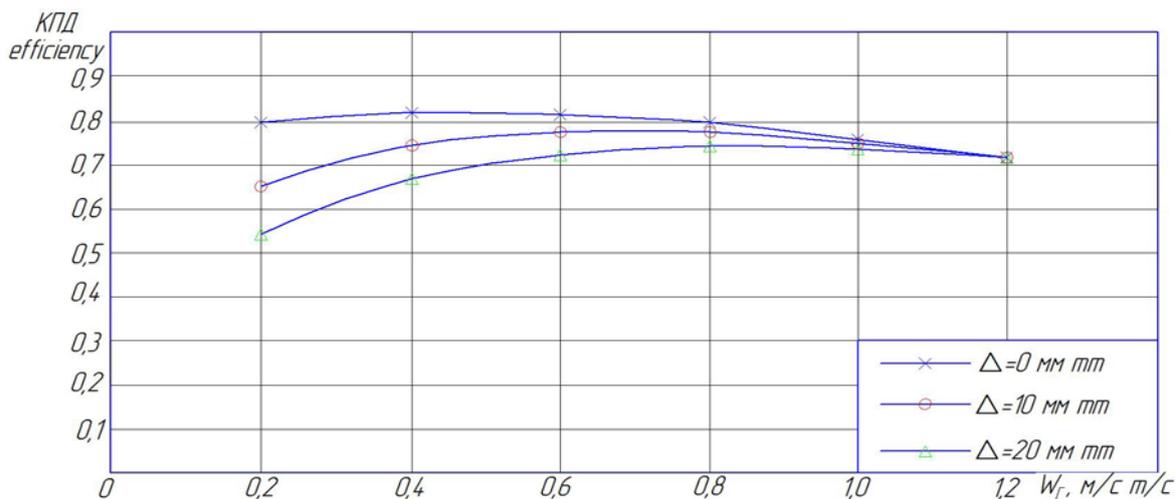


Рисунок 2. Зависимость КПД ситчатой тарелки по Мерффри от градиента уровня жидкости при различных скоростях газа

Figure 2. Dependence of Murphy's sieve plate efficiency on the liquid level gradient at different gas velocities

**Закключение**

Снижение эффективности тарельчатых массообменных аппаратов на 5–35%, применяемых

в нефтехимическом производстве, обусловлено градиентом уровня жидкости, а также типом контактного устройства и скоростью газа.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Башаров М.М., Зарипов Р.Т., Долгова А.Н. Повышение эффективности аппаратов и энергосбережение в производстве этилена // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2012. № 4(15). С. 16-25.
- 2 Шевцов А.А., Дерканосова А.А., Коротаева А.А., Муравьев А.С. Моделирование процесса распылительной сушки суспензии протеинового зеленого концентрата (ПЗК) // Вестник ВГУИТ. 2015. № 1(63). С. 51-57.
- 3 Лаптев А.Г., Минеев Н.Г., Мальковский П.А. Проектирование и модернизация аппаратов разделения в нефте- и газопереработке Казань, Печатный двор, 2002. 307 с.
- 4 Алтайулы С., Антипов С.Т., Павлов И.О. Нестационарный массообмен в вакуум ротационно-пленочном аппарате при влагоудалении из фосфолипидной эмульсии // Вестник ВГУИТ. 2012. № 1(58). С. 44-48.
- 5 Hong G. B. и др. Energy flow analysis in pulp and paper industry // Energy. 2011. Т. 36. № 5. С. 3063-3068.
- 6 Kiss A. A. Distillation technology – still young and full of breakthrough opportunities // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2014. Т. 89. № 4. С. 479-498.
- 7 Balaton M. G., Nagy L., Szeifert F. Operator training simulator process model implementation of a batch processing unit in a packaged simulation software // Computers & Chemical Engineering. 2013. Т. 48. С. 335-344.
- 8 Kakac S., Liu H., Pramuanjaroenkij A. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design. CRC press, 2012.
- 9 Lam K. F., Sorensen E., Gavriilidis A. Review on gas-liquid separations in microchannel devices // Chemical Engineering Research and Design. 2013. Т. 91. № 10. С. 1941-1953.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Александр Б. Емельянов** к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов химических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, okipr-mip@mail.ru

**Максим В. Мальцев** к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов химических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, max\_proekt@mail.ru

**Виктор Б. Попов** магистр, кафедра машин и аппаратов химических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия,

## КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 27.03.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 18.04.2017

## REFERENCES

- 1 Basharov M.M., Zaripov R.T., Dolgova A.N. Improving the efficiency of vehicles and energy efficiency in the production of ethylene. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Proceedings of Kazan state power engineering University]. 2012. no. 4(15). pp. 16-25. (in Russian).
- 2 Shevtsov A.A., Derkanosova A.A., Korotaeva A.A., Murav'ev A.S. The simulation of spray drying of a suspension of green protein concentrate (USC). *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2015. no. 1(63). pp. 51-57. (in Russian).
- 3 Laptev A.G., Mineev N.G., Mal'kovskii P.A. Proektirovanie i modernizatsiya apparatov razdeleniya v nefte- i gazopererabotke [Design and modernization of separation apparatuses in oil and gas processing]. Kazan', Pechatnyi dvor 2002. 307 p. (in Russian).
- 4 Altaiuly S., Antipov S.T., Pavlov I.O. Nonstationary mass transfer in a vacuum rotary-film apparatus for the dripping of phospholipid emulsion. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2012. no. 1(58). pp. 44-48. (in Russian).
- 5 Hong G. B. et al. Energy flow analysis in pulp and paper industry. *Energy*. 2011. vol. 36. no. 5. pp. 3063-3068.
- 6 Kiss A. A. Distillation technology – still young and full of breakthrough opportunities. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2014. vol. 89. no. 4. pp. 479-498.
- 7 Balaton M. G., Nagy L., Szeifert F. Operator training simulator process model implementation of a batch processing unit in a packaged simulation software. *Computers & Chemical Engineering*. 2013. vol. 48. pp. 335-344.
- 8 Kakac S., Liu H., Pramuanjaroenkij A. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design. CRC press, 2012.
- 9 Lam K. F., Sorensen E., Gavriilidis A. Review on gas-liquid separations in microchannel devices. *Chemical Engineering Research and Design*. 2013. vol. 91. no. 10. pp. 1941-1953.

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Aleksandr B. Emel'janov** candidate of technical sciences, assistant professor, machines and apparatuses of chemical production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, okipr-mip@mail.ru

**Maxim V. Maltsev** candidate of technical sciences, assistant professor, machines and apparatuses of chemical production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, max\_proekt@mail.ru

**Viktor B. Popov** master, machines and apparatuses of chemical production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia,

## CONTRIBUTION

All authors equally took part in writing the manuscript and are responsible for plagiarism

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 3.27.2017

ACCEPTED 4.18.2017