УДК 66.048.3:66.069.83

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ КЕРОСИНА С ПОРОПЛАСТОВЫМИ ТАРЕЛКАМИ

MODELING OF KEROSENE FRACTIONATION RECTIFICATION COLUMN OPERATION WITH POROUS PLASTIC PLATES

Рублева Анна Алексеевна
студентка кафедры процессы и аппараты химических и пищевых производств,
Волгоградский государственный технический университет
annaro167325@gmail.com

Васильев Пётр Сергеевич
кандидат технических наук,
доцент,
доцент кафедры процессы и аппараты химических и пищевых производств,
Волгоградский государственный технический университет
nestorvv@mail.ru

Аннотация. Показана принципиальная возможность использования пропластовых контактных устройств в тепломассообменных процессах разделения нефтепродуктов и теоретически доказана высокая эффективность их работы.

Ключевые слова: тепломассообмен, керосин, аппарат, тарелка, губчатая резина, расчёт.

Rubleva Anna Alekseevna
Student of the Department Processes and Apparatus of Chemical and Food Production,
Volgograd State Technical University
annaro167325@gmail.com

Vasilyev Pyotr Sergeevich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department Processes and Apparatus of Chemical and Food Production,
Volgograd State Technical University
nestorvv@mail.ru

Annotation. The principal possibility of using porous plastic contact devices in heat and mass transfer processes of oil products separation is shown and their high efficiency is theoretically proved.

Keywords: heat and mass transfer, kerosene, apparatus, plate, foam rubber, calculation.

Многие технологические процессы химической и смежных с ней отраслей промышленности осуществляются в колонных тепломассообменных аппаратах с насадочными и тарельчатыми контактными устройствами. Разработка высокоэффективных контактных устройств, способствующих значительному увеличению интенсивности протекания тепломассообменных процессов, определяющей производительность, размеры и стоимость колонных аппаратов, является актуальной задачей современной промышленности.

В настоящее время возрос интерес к контактным устройствам, изготовленным из различных пропластовых материалов, обладающих большой удельной поверхностью, например губчатых резин. Такие контактные устройства весьма широко используют для осуществления процессов очистки газов (природного, попутного) от жидкости, дезодорации воздуха, а также биореакционных процессов [1]. При этом изготовление насадочных и тарельчатых контактных устройств из пропластовых материалов не представляет технологических трудностей, а по своим эксплуатационным свойствам они не уступают аналогам из других материалов (керамики, металла) [2, 3].

Например, изменяя состав резиновых смесей при введении в них различных каучуков и термопластичных материалов, можно добиться получения губчатых резин с хорошими низкотемпературными свойствами, а также резин, стойких к действию алифатических масел, серной кислоте, щёлочам, аммиачной селитре, с высокой свето-, озоно-, атмосферо- и износостойкостью, не поддерживающих горения и обладающих хорошим сопротивлением к тепловому старению, предназначенных для работы при температуре от –55 °С до +250 °С [1].

Керосин является дефицитным нефтепродуктом, имеющим большое количество различных потребителей, в основном использующих его в качестве топлива, растворителя и абсорбента. Разделение керосина на отдельные фракции осуществляют, как правило, в тарельчатых вакуумных ректификационных колоннах. При этом наибольшая чёткость его фракционирования обеспечивается использованием колпачковых тарелок.

Целью работы является сравнение результатов моделирования работы ректификационной колонны фракционирования керосина с пропластовыми и колпачковыми тарелками.

В качестве модельной среды был взят осветительный керосин марки КО-25, в процессе фракционирования которого температура его тяжёлой фракции в кубе работающей под вакуумом 0,5 МПа

ректификационной колонны равна 180 °С, а температура лёгкой фракции в верхней части колонны равна 115 °С.

При непосредственном контакте с керосиновыми фракциями длительное воздействие таких температур выдерживает резиновая смесь марки ЭГ-83 (ТУ 2512-014-29268077-2007), которая была рекомендована в качестве основы для изготовления листовой губчатой резины для ситчатых поропластовых тарелок со сливными устройствами.

В связи с тем, что каждая поропластовая тарелка по сути представляет собой слоя насадки, технологический расчёт ректификационной колонны фракционирования керосина с поропластовыми тарелками выполнялся с использованием авторской методики [4], учитывающей равенство числа единиц переноса по газовой (паровой) фазе числу теоретических ступеней изменения концентрации (теоретических тарелок). Ниже приведены основные расчётные зависимости (укрепляющая и исчерпывающая части ректификационной колонны рассчитываются отдельно).

1. Суммарную толщину губчатой резины для всех поропластовых тарелок рассчитывают по уравнению, м:

$$H_n = \frac{w_{опт} \cdot n_{0y}}{K_{yV}}, \quad (1)$$

где $w_{опт} = \frac{\mathrm{Re}_y \cdot \mu_y}{\psi \cdot d_э \cdot \rho_y}$ – оптимальная скорость пара, равная 80 % от скорости захлёбывания, м/с;

$\mathrm{Re}_y = 0{,}045 \cdot \mathrm{Ar}^{0{,}57} \cdot \left(\frac{G}{L}\right)^{0{,}43}$ – число Рейнольдса для пара; $\mathrm{Ar} = \frac{g \cdot d_э^3 \cdot \rho_x \cdot \rho_y}{\mu_y^2}$ – число Архимеда; G, L – массовые расходы пара и жидкости соответственно, кг/с; $d_э$ – эквивалентный диаметр пор губчатой резины, м; ψ – доля рабочего сечения тарелки; ρ_y, ρ_x – плотности пара и жидкости соответственно, кг/м^3; μ_y – вязкость пара, Па·с; $n_{0y} = \int_{y_н}^{y_к} \frac{dy}{y^* - y}$ – число единиц переноса в паровой фазе; y, y^* – рабочая и равновесная концентрации перераспределяемого компонента в паровой фазе соответственно, моль/моль; $y_н$, $y_к$ – начальная и конечная концентрации перераспределяемого компонента в паровой фазе соответственно, моль/моль; $K_{yV} = \frac{\mathrm{Nu}_{*y} \cdot D_y}{d_э^2}$ – объёмный коэффициент массопередачи в паровой фазе, 1/с;

$\mathrm{Nu}_{*y} = 0{,}035 \cdot \mathrm{Re}_y^{0{,}8} \cdot \mathrm{Pr}_{*y}^{0{,}3}$ – число Нуссельта для пара; $\mathrm{Pr}_{*y} = \frac{\mu_y}{\rho_y \cdot D_y}$ – число Прандтля для пара; D_y – коэффициент диффузии в паровой фазе, м^2/с.

2. По диаграмме фазового равновесия в зависимости от взаимного расположения рабочей и равновесной линий процесса ректификации определяют число теоретических тарелок (теоретических ступеней изменения концентрации) в поровой фазе N_m.

3. Средний коэффициент полезного действия по Мэрфри вычисляют с помощью выражения:

$$E_y = 1 - \exp\left(-n_{0y}\right). \quad (2)$$

4. Число действительных поропластовых тарелок определяют по формуле:

$$N_д = \frac{N_m}{E_y}. \quad (3)$$

5. Толщину листа губчатой резины одной поропластовой тарелки рассчитывают по формуле, м:

$$H_m = \frac{H_n}{N_д}. \quad (4)$$

6. Гидравлическое сопротивление колонного аппарата с поропластовыми тарелками определяют по уравнению, Па:

$$\Delta p = \left(\Delta p_{op} + \Delta p_{ст} + \Delta p_{\sigma}\right) \cdot N_{д}, \quad (5)$$

где $\Delta p_{op} = (1+f) \cdot \lambda \cdot \frac{H_m}{d_э} \cdot \frac{\rho_y \cdot w_{onm}^2}{2 \cdot \varepsilon^2}$ – гидравлическое сопротивление орошаемой тарелки, Па;

$f = 3{,}33 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{0{,}342} \cdot \left(\frac{\rho_y}{\rho_x}\right)^{0{,}190} \cdot \left(\frac{\mu_x}{\mu_y}\right)^{0{,}038}$ – фактор гидродинамического состояния; μ_x – вязкость жидкости, Па·с; $\lambda = \frac{160}{\mathrm{Re}_y}$ – коэффициент сопротивления; ε – порозность губчатой резины, м³/м³; $\Delta p_{ст} = g \cdot \rho_x \cdot h_0$ – гидравлическое сопротивление слоя пены на тарелке, Па; $h_0 = h_n \cdot (1-\varphi)$ – высота светлого слоя жидкости, м; $h_n = 4 \cdot d_э \cdot \mathrm{Fr}^{0,2}$ – высота слоя пены, м; $\mathrm{Fr} = \frac{w_{onm}^2}{g \cdot \varepsilon^2 \cdot d_э}$ – первое число Фруда для парожидкостного слоя; $\varphi = 0{,}9 \cdot \exp(-0{,}0423 \cdot \mathrm{Fr}_0)$ – газосодержание барботажного слоя, м³/м³; $\mathrm{Fr}_0 = \frac{w_{onm}^2}{g \cdot \varepsilon^2 \cdot h_n}$ – второе число Фруда для парожидкостного слоя; $\Delta p_{\sigma} = \frac{4 \cdot \sigma_x}{d_э}$ – гидравлическое сопротивление, вызванное силами поверхностного натяжения жидкости на тарелке, Па; σ_x – поверхностное натяжение жидкости, Н/м.

Технологический расчёт ректификационной колонны фракционирования керосина с колпачковыми тарелками типа ТСК-Р выполнялся по стандартной методике.

В таблице 1 приведены основные исходные данные и результаты сравнительного расчёта работы ректификационной колонны фракционирования керосина с пропластовыми и колпачковыми тарелками.

На рисунке 1 представлена диаграмма фазового равновесия бинарной смеси «лёгкая керосиновая фракция – тяжёлая керосиновая фракция» для рабочего флегмового числа R = 0,432, найденного из условия наименьшего объёма аппарата по стандартной методике.

Таблица 1 – Основные исходные данные и результаты сравнительного расчёта ректификационной колонны фракционирования керосина

Порядковый номер и наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина*
I. Основные исходные данные			
1. Расход исходной смеси (КО-25)	кг/ч	G_f	10000
2. Порозность губчатой резины [4]	м³/м³	ε	0,75
3. Удельная поверхность губчатой резины [4]	м³/м³	a	900
4. Доля рабочего сечения тарелки [4]	–	ψ	0,9
II. Основные расчётные параметры			
5. Минимальное флегмовое число	–	R_{min}	0,018
6. Рабочее флегмовое число	–	R	0,432
7. Стандартный диаметр аппарата	м	$D_к$	1,4 / 1,4
8. Число действительных тарелок	–	$N_д$	5 / 6
9. Общая высота аппарата	м	$H_к$	5,82 / 6,48
10. Гидравлическое сопротивление аппарата	Па	Δp	400 / 2640

* слева указано значение для пропластовых тарелок, справа – для колпачковых.

Таким образом, анализ результатов моделирования работы ректификационной колонны фракционирования керосина показывает, что пропластовые тарелки обладают на 15÷20 % большей эффективностью по сравнению с классическими колпачковыми тарелками с капсюльными колпачками, являющимися на сегодняшний день одними из самых эффективных, что позволяет рекомендовать их для проведения различных тепломассообменных процессов в химической и смежной с ней отраслях промышленности.

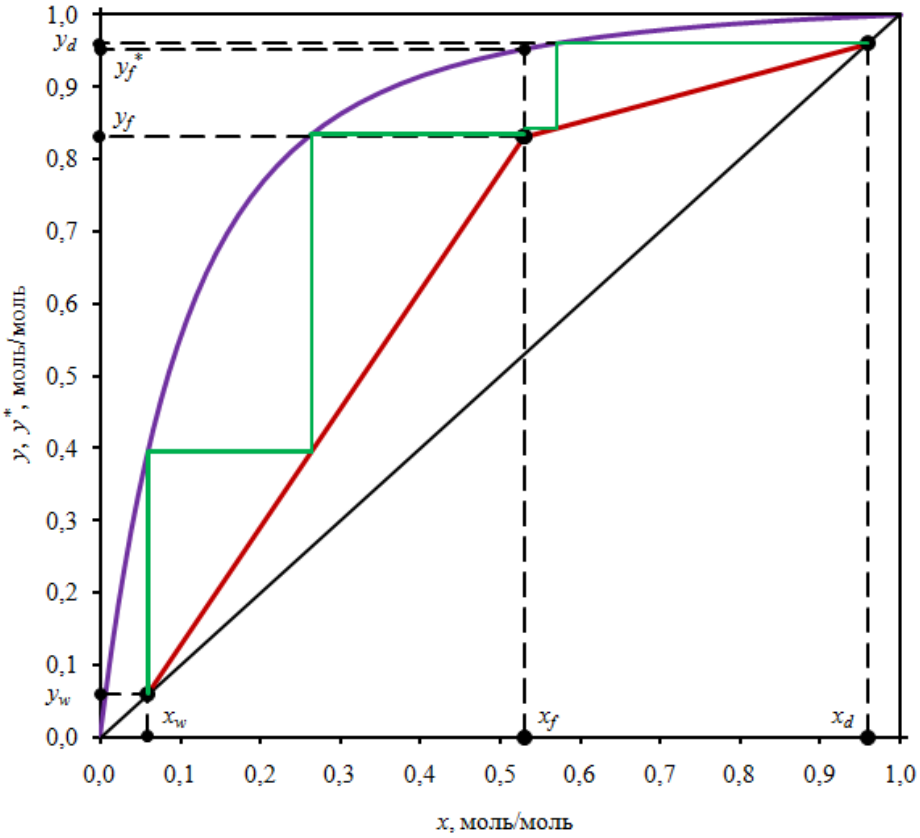

Рисунок 1 – Диаграмма фазового равновесия процесса бинарного фракционирования осветительного керосина марки КО-25

Список литературы

1. Пропластовые насадки для тепло- и массообменных процессов / А.Б. Голованчиков [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 12. – С. 3–6.

2. П. м. 131311 РФ, МПК B01J19/00. Насадка для массообменного аппарата / А.Б. Голованчиков, П.С. Васильев, Н.А. Дулькина, Т.Б. Агеева, В.В. Разуваев, В.Я. Закурский; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. 2013104528/05; заявлен 04.02.2013; опубликован 20.08.2013.

3. П. м. 135522 РФ, МПК B01D3/00. Массообменная тарелка / А.Б. Голованчиков, П.С. Васильев, С.Л. Рева, Л.С. Рева, А.С. Юдина, А.Е. Альменова; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. – 2013130814/05; заявлен 04.07.2013; опубликован 20.12.2013.

4. Методика расчёта тепломассообменных аппаратов с пропластовыми контактными устройствами / П.С. Васильев [и др.] // Вестник МГТУ. – 2022. – Т. 25. – № 3. – С. 259–269.

List of references:

1. Porous Plastic Packing for Heat and Mass Transfer Processes / A.B. Golovanchikov [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – Vol. 53. – Iss. 11–12 (March 2018). – P. 759–764.

2. U. m. 131311 RU, IPC B01J19/00. Nozzle for mass transfer apparatus / A.B. Golovanchikov, P.S. Vasiliev, N.A. Dulkina, T.B. Ageyeva, V.V. Razuvaev, V.Y. Zakursky; declarer and patentee VSTU. 2013104528/05; declared 04.02.2013; published 20.08.2013.

3. U. m. 135522 RU, IPC B01D3/00. Mass transfer plate / A.B. Golovanchikov, P.S. Vasiliev, S.L. Reva, L.S. Reva, A.S. Yudina, A.E. Almenova; declarer and patentee VSTU. – 2013130814/05; declared 04.07.2013; published 20.12.2013.

4. Calculation method for heat and mass transfer apparatuses with porous plastic contact devices / P.S. Vasilyev [et al.] // Vestnik of MSTU. – 2022. – Vol. 25. – Iss. 3. – P. 259–269.