

*РАСЧЕТ НАСАДОЧНЫХ КОЛОНН ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ  
БРАГОРЕКТИФИКАЦИОННЫХ УСТАНОВОК*

**Е.Н. КОНСТАНТИНОВ<sup>1</sup>, Т.Г. КОРОТКОВА<sup>1</sup>, С.Ю. КСАНДОПУЛО<sup>1</sup>,  
С.С. МАРИНЕНКО<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;  
электронная почта: [korotkova1964@mail.ru](mailto:korotkova1964@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Майкопский государственный технологический университет,  
352700, Российская Федерация, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191;  
электронная почта: [ital01988@mail.ru](mailto:ital01988@mail.ru)*

Проблема полной утилизации сивушных спиртов и сивушных масел остается нерешенной. В сивушной колонне для обеспечения качества ректификованного спирта отбирают боковые погоны: вторичное сивушное масло и вторичный сивушный спирт. В настоящее время эти два продукта не находят сбыта и накапливаются в товарном парке. За счет дыхания емкостей вследствие суточного изменения температур увеличиваются выбросы вредных веществ в атмосферу. В конечном итоге из-за отсутствия сбыта эти продукты уничтожаются, загрязняя окружающую среду. Вместе с ними теряется 2 % спирта от потенциального содержания этанола в бражке. Это составляет порядка 600 л спирта в сутки. Проблема может быть решена путем использования дополнительной насадочной колонны периодического действия. В работе получено уравнение для определения высоты, эквивалентной одной теоретической ступени, в котором высота единицы переноса рассчитывается с использованием эмпирических уравнений. Средняя разность равновесной и рабочей концентраций на теоретических ступенях и тангенс угла наклона равновесной кривой изменяются существенно по высоте колонны. В рамках изменения концентраций на одной ступени равновесная кривая заменена отрезком прямой. Предложенный алгоритм позволяет выполнить расчет насадочной колонны периодического действия, предназначенной для утилизации вторичного сивушного спирта, отбираемого из изопропанольной колонны и накапливаемого в емкостях. Это решает проблему защиты окружающей среды при соблюдении требований экологической безопасности. Предложенный метод расчета является более удобным и быстрым и не требует проведения специальных исследований для определения высоты, эквивалентной одной теоретической ступени.

**Ключевые слова:** брагоректификация, сивушный спирт, насадочная колонна, теоретическая ступень.

Увеличение выхода спирта, снижение загрязнения окружающей среды вторичными продуктами брагоректификации и уменьшение тепловых выбросов в атмосферу является важной экономической и экологической задачей спиртового производства. Учитывая, что совершенствование технологического режима и схемы брагоректификационной установки (БРУ) направлено главным

образом на увеличение выхода спирта, на типовой установке косвенного действия, включающей три тарельчатые колонны, предложено использовать дополнительно сивушную колонну насадочного типа эффективностью 55...60 теоретических тарелок. На этой колонне перерабатываются сивушные спирты, отбираемые с ректификационной колонны [1]. Они являются побочным продуктом брагоректификации и содержат значительное количество этилового спирта.

Однако проблема полной утилизации сивушных спиртов и сивушных масел остается нерешенной. В сивушной колонне для обеспечения качества ректифицированного спирта вынуждены отбирать боковые погоны: вторичное сивушное масло и вторичный сивушный спирт. В настоящее время эти два продукта не находят сбыта, накапливаются в товарном парке и за счет дыхания емкостей вследствие суточного изменения температур увеличивают выбросы вредных веществ в атмосферу. В конечном итоге из-за отсутствия сбыта эти продукты уничтожаются. Вместе с ними теряется 2 % спирта от потенциального содержания этанола в бражке. Это составляет 600 л спирта в сутки. В работе [2] обоснована технология переработки вторичного сивушного спирта на насадочной колонне, которая приводит к повышению выхода ректифицированного спирта и снижению техногенных отходов. Для проектирования разработано математическое описание процесса периодической ректификации в насадочной колонне в виде системы уравнений математической физики. Поиск оптимального режима БРУ, оснащенной насадочной колонной, потребовал больших затрат машинного времени. Поэтому в процессе поиска использовалась модель тарельчатой колонны. Он проводился в интегрированной среде моделирования HYSYS, в которой имеется программный модуль тарельчатой ректификационной колонны. Более точная модель использовалась на окончательной стадии вычислений. Установка кубового аппарата с ректификационной колонной насадочного типа периодического действия позволила повысить выход этанола от

потенциального содержания в бражке с 97,5 до 99,5 %. При этом ректификованный спирт отвечает требованиям марки «Люкс».

Кроме того насадочные колонны используются для проверки эффективности схем с тепловым насосом на спиртовой колонне [3].

Согласно общепринятой методике расчета высоты насадочной колонны используются два показателя: число единиц переноса и высота единиц переноса. Для расчета высоты единицы переноса для насадок различного типа и размера накоплен большой экспериментальный материал, который обобщен в виде критериальных уравнений [4, 5]. Метод расчета на базе числа единиц переноса приемлем при решении прямой задачи определения требуемой высоты колонны. При использовании насадочных колонн в качестве элемента химико-технологической системы сложной структуры, а также при анализе экспериментальных данных, получаемых на установках периодической ректификации с насадочной колонной, приходится выполнять большой объем вычислений. В этом случае предпочтительнее использовать подробно разработанные методики расчета колонн по теоретическим ступеням.

Рассмотрим вопрос о расчете высоты, эквивалентной одной теоретической ступени. Средняя разность равновесной и рабочей концентраций на теоретических ступенях и тангенс угла наклона равновесной кривой изменяются существенно по высоте колонны. Обычно в рамках изменения концентраций на одной ступени равновесную кривую заменяют отрезком прямой. В координатах  $y$ - $x$  изменение концентраций на некоторой теоретической ступени приведено на рис. 1. На участке насадочной колонны, который соответствует одной теоретической ступени, концентрация приходящих снизу паров  $y_H$  является встречной с концентрацией жидкости  $x_K$ , покидающей этот участок. В верхнем сечении этот участок покидают пары с концентрацией  $y_K$ . Эти пары на теоретической ступени находятся в равновесии с жидкостью состава  $x_K$ , т.е. их концентрация равна  $y_K^*$ , где индекс «\*» означает равновесие. Навстречу покидающим ступень парам поступает

жидкость с концентрацией  $x_H$ , а концентрация равновесных с ней паров равна  $y_H^*$ . Таким образом, движущая сила на входе в участок (в его нижнем сечении) равна  $\Delta y_H = y_K^* - y_H$ , а движущая сила на выходе (в верхнем сечении)  $\Delta y_K = y_H^* - y_K$ .

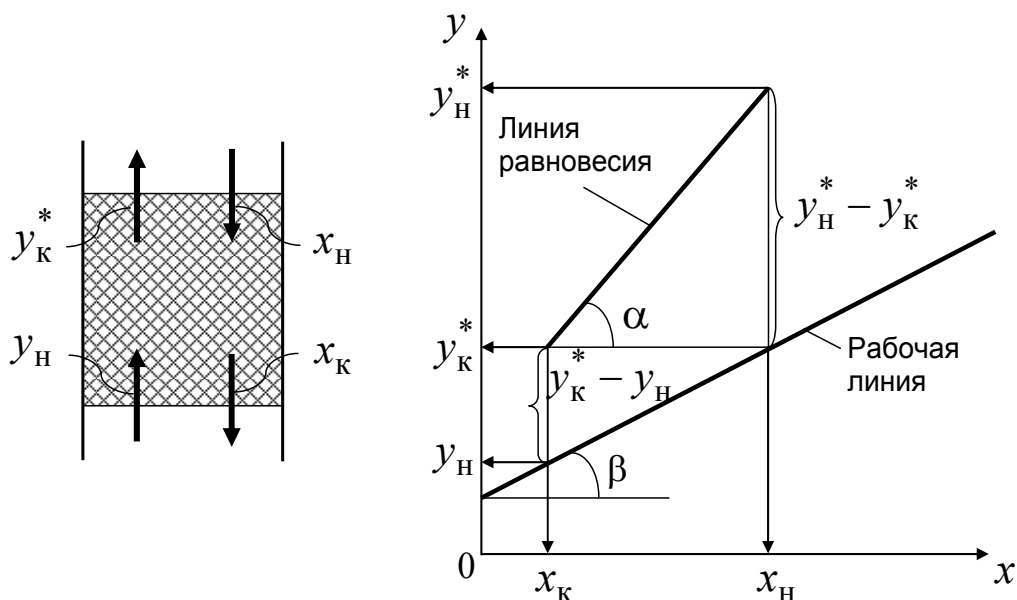


Рис. 1. Теоретическая ступень на диаграмме  $y-x$

Если отношение движущих сил меньше двух, то средняя движущая сила процесса массопередачи  $\Delta y_{cp}$  на рассматриваемом участке насадочной колонны определится следующим образом

$$\Delta y_{cp} = \frac{(y_H^* - y_K) + (y_K^* - y_H)}{2}. \quad (1)$$

Введем следующие обозначения

$$\frac{y_H^* - y_K^*}{x_H - x_K} = \operatorname{tg} \alpha = m; \quad (2)$$

$$\frac{y_K^* - y_H}{x_H - x_K} = \operatorname{tg} \beta = \frac{R}{R + 1}, \quad (3)$$

где  $m$  - тангенс угла наклона равновесной кривой;  $R$  - флегмовое число.

Подставив уравнения (2) и (3) в уравнение (1), получим

$$\Delta y_{\text{cp}} = \frac{x_{\text{H}} - x_{\text{K}}}{2} \left( m + \frac{R}{R+1} \right). \quad (4)$$

Количество перенесенного вещества на теоретической ступени  $M$  по уравнениям материального баланса и массопередачи

$$M = L(x_{\text{H}} - x_{\text{K}}) = K_y F_{\text{TT}} \Delta y_{\text{cp}}, \quad (5)$$

где  $L$  - расход жидкой фазы, кмоль/с;  $K_y$  - коэффициент массопередачи, кмоль/(м<sup>2</sup>с);  $F_{\text{TT}}$  - поверхность массообмена на теоретической ступени.

Подставив (4) в (5), получим

$$L(x_{\text{H}} - x_{\text{K}}) = K_y F_{\text{TT}} \frac{x_{\text{H}} - x_{\text{K}}}{2} \left( m + \frac{R}{R+1} \right). \quad (6)$$

Учтем, что

$$K_y = \frac{G}{hSa}, \quad (7)$$

где  $G$  - расход паровой фазы, кмоль/с;  $h$  - высота единицы переноса, м;  $S$  - площадь поперечного сечения колонны, м<sup>2</sup>;  $a$  - удельная поверхность насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

Поверхность массопередачи на теоретической ступени, м<sup>2</sup>

$$F_{\text{TT}} = h_{\text{TT}} Sa, \quad (8)$$

где  $h_{\text{TT}}$  - высота насадки, эквивалентная одной теоретической ступени, м.

Перемножая левые и правые части уравнений (7) и (8), получим

$$K_y F_{\text{TT}} = \frac{G h_{\text{TT}}}{h}. \quad (9)$$

Подставляя уравнение (9) в уравнение (6), имеем

$$L = \frac{G h_{\text{TT}}}{h} \frac{1}{2} \left( m + \frac{R}{R+1} \right). \quad (10)$$

Так как  $\frac{L}{G} = \frac{R}{R+1}$ , то

$$\frac{R}{R+1} = \frac{h_{\text{TT}}}{h} \frac{1}{2} \left( m + \frac{R}{R+1} \right). \quad (11)$$

Откуда

$$h_{\text{ТТ}} = \frac{2h}{m\left(\frac{R+1}{R}\right)+1}. \quad (12)$$

Уравнение (12) позволяет для всех теоретических ступеней вычислить высоты и после их сложения получить высоту насадочной части колонны. Величина высоты единицы переноса  $h$  рассчитывается при этом с использованием эмпирических уравнений по известной методике [4, 5].

Таким образом, для расчета высоты теоретической ступени можно применять известные эмпирические уравнения для высоты единиц переноса. Использование метода расчета с понятием о высоте теоретической ступени как более удобного и быстрого не требует проведения специальных исследований для определения высоты, эквивалентной одной теоретической ступени.

Утилизация вторичного сивушного спирта позволяет решить проблемы защиты окружающей среды при соблюдении требований экологической безопасности: снижении содержания высших спиртов в лютерной воде, а также вредных веществ в выбросах в окружающую среду.

#### Литература

1. ФГУП "РНЦ "Прикладная химия" <http://www.rscac.spb.ru>
2. Короткова Т.Г., Константинов Е.Н. Разработка математической модели периодической ректификации насадочной колонны // Изв. вузов. Пищевая технология. 2012. № 2-3. С. 108-112.
3. Мариненко С.С., Мариненко О.В., Константинов Е.Н., Короткова Т.Г. Методы расчета процесса сжатия паров спирта при использовании в схеме БРУ теплового насоса // Изв. вузов. Пищевая технология. 2011. № 2-3. С. 76-78.
4. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976. 656 с.
5. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача / Пер. с англ.-М.: Химия, 1982. 696 с.

#### REFERENCES

1. FGUP "RNC "Prikladnaja himija" <http://www.rscac.spb.ru>

2. Korotkova T.G., Konstantinov E.N. Razrabotka matematicheskoj modeli periodicheskoj rektifikacii nasadochnoj kolonny // Izv. vuzov. Pishhevaja tehnologija. 2012. № 2-3. S. 108-112.

3. Marinenko S.S., Marinenko O.V., Konstantinov E.N., Korotkova T.G. Metody rascheta processa szhatija parov spirta pri ispol'zovanii v sheme BRU teplovogo nasosa // Izv. vuzov. Pishhevaja tehnologija. 2011. № 2-3. S. 76-78.

4. Ramm V.M. Absorbicija gazov. – M.: Himija, 1976. 656 s.

5. Shervud T., Pigford R., Uilki Ch. Massoperedacha / Per. s angl.-M.: Himija, 1982. 696 s.

## CALCULATION OF THE MODELING PACKED COLUMN DISTILLATION PLANTS

**Eu. KONSTANTINOV<sup>1</sup>, T.G. KOROTKOVA<sup>1</sup>, S.Ju. KSANDOPULO<sup>1</sup>,  
S.S. MARINENKO<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Kuban State Technological University,  
350072, Russian Federation, Krasnodar, 2, Moskovskaya str.;*  
*e-mail: [korotkova1964@mail.ru](mailto:korotkova1964@mail.ru)*

<sup>2</sup> *Maikop State Technological University,  
352700, Russian Federation, Maikop, 191, Pervomaiskaya str.;*  
*e-mail: [ital01988@mail.ru](mailto:ital01988@mail.ru)*

The problem of full utilization of fusel alcohols and fusel oils remains unsolved. In fusel column to ensure the quality of rectified alcohol selected side straps: secondary fusel oil and secondary fuel alcohols. Currently, these two products are not accumulated in the marketing and product park. Due to respiration tanks due diurnal temperature change increases the emission of harmful substances into the atmosphere. Ultimately, due to lack of marketing these products are destroyed, polluting the environment. Together with them lost 2% of alcohol content from the potential in the mash ethanol. It is about 600 liters of alcohol per day. The problem can be solved by using an additional batch of a packed column. In this paper we derive an equation to determine the height equivalent to a theoretical stage, in which the height of the transfer unit is calculated using empirical equations. The mean difference of the equilibrium concentrations and working on the theoretical levels and the slope of the equilibrium curve vary substantially in height of the column. As part of changes in the concentrations at one stage the equilibrium curve is replaced by a line segment. The proposed algorithm provides an estimation of the packed column batch destined for the recycling of recovered fuel alcohols, isopropanol withdrawn from the column and accumulated in the tanks. This solves the problem of environmental protection in compliance with the requirements of environmental safety. The proposed calculation method is faster and more convenient and does not require special studies to determine the height equivalent to a theoretical stage.

**Keywords:** distillation plant, fusel alcohol, packed column, the theoretical stage.