

*Досліджено вплив рухомих розподілених регулюючих дій на процеси тепло- і масообміну в ректифікаційній колоні. Встановлено характер впливу рухомих розподілених регулюючих дій на керовані величини. Показана можливість вибору допустимої регулюючої дії. Отримані результати можуть бути використані при розробці систем статичної оптимізації та оптимального управління процесу ректифікації*

*Ключові слова: автоматичне керування, тепломасообмінні процеси, ректифікація, розподілені регулюючі дії, рухливе управління*

*Исследовано влияние подвижных распределенных регулирующих воздействий на процессы тепло- и массообмена в ректификационной колонне. Установлен характер влияния подвижных распределенных регулирующих воздействий на управляемые величины. Показана возможность выбора допустимого регулирующего воздействия. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем статической оптимизации и оптимального управления процесса ректификации*

*Ключевые слова: автоматическое управление, тепломассообменные процессы, ректификация, распределенные регулирующие воздействия, подвижное управление*

# АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОМАССО- ОБМЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ С ПОДВИЖНЫМИ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ РЕГУЛИРУЮЩИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

**Е. В. Белоброва**

Аспирант\*

E-mail: belobrova\_e\_v@mail.ru

**А. Р. Шейкус**

Аспирант\*

E-mail: a.sheykus@gmail.com

**В. И. Корсун**

Доктор технических наук, профессор

Кафедра информационно-измерительных технологий и метрологии

Национальный горный университет

пр. К. Маркса, 19, г. Днепропетровск, Украина, 49000

E-mail: korsun@ua.fm

\*Кафедра компьютерно-интегрированных технологий и метрологии

Украинский государственный

химико-технологический университет

пр. Гагарина, 8, г. Днепропетровск, Украина, 49000

## 1. Введение

Тепломассообменные процессы, характеризующиеся совместным протеканием процессов тепло- и массообмена между двумя или несколькими средами, встречаются во многих технических системах [1]. Эти процессы могут происходить в различных средах: чистых веществах, бинарных и многокомпонентных смесях, при изменении агрегатного состояния и без него. Среди тепломассообменных процессов одним из наиболее часто используемых в различных отраслях промышленности является процесс ректификации. Суть этого процесса заключается в многократно повторяющихся по высоте колонны процессах испарения жидкости и конденсации паров. Научные основы процессов ректификации изложены в [2].

Процесс ректификации, несмотря на высокую энергоёмкость и сложность физических превращений, остаётся основным способом разделения жидких смесей, компоненты которых различаются по температурам кипения. Повышенные требования к каче-

ству получаемых продуктов и высокая энергоёмкость процесса ректификации обуславливают актуальность задачи разработки эффективных систем управления.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Требования к системам автоматического управления ректификационными установками сводятся, в первую очередь, к поддержанию заданного состава целевого продукта и к экономичному расходу энерго-ресурсов

Исследование систем автоматического управления ректификационными установками посвящено большое количество работ. В работах [3] проведен критический обзор существующих способов управления ректификационными установками. Таких как по материальному и тепловому балансам, путем регулирования параметров на контрольных тарелках и др. Вопросы выбора критерия оптимальности при

решении задач оптимального управления процессами ректификации рассмотрены в работе [4]. Известен способ автоматического управления ректификационной колонны на основе нейронных сетей [5]. В связи с внедрением средств микропроцессорной и вычислительной техники, часто применяют системы автоматизации с поиском оптимальных условий – проведение процесса на математической модели [6].

В рассмотренных работах установка ректификации рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами, а управляющие воздействия наносятся традиционным способом – путем изменения расхода материального или энергетического потоков.

В работе [7] приведено описание нового подхода к решению задачи оптимизации системы ректификационных колонн в которой наряду с непрерывными режимными поисковыми переменными используется дискретные переменные – номера тарелок ввода питания в колонны.

В последние годы для объектов с распределенными параметрами успешно применяются системы так называемого «подвижного управления» с подвижными распределенными регулирующими воздействиями.

В [8] изложены постановки типовых задач управления с помощью подвижных источников воздействия системами с распределенными параметрами, которые описываются уравнениями теплопроводности.

В работе [9, 10] рассматриваются вопросы оптимального управления совмещенными процессами с распределенными управляющими воздействиями.

В ходе изучения вопроса об управлении процессом ректификации, анализа выполненных работ и проведения исследований был получен патент на полезную модель.

### 3. Цель и задачи исследования

Проведенные исследования ставили своей целью определить особенности процессов управления ректификационными установками с подвижными распределенными регулирующими воздействиями (точка ввода сырья и расход паров в колонне).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка математической модели ректификационной установки;
- исследование статических характеристик каналов управления с подвижными распределенными регулирующими воздействиями методом имитационного моделирования.

### 4. Методы и средства проведения исследований влияния подвижных распределенных регулирующих воздействий на ход и конечные результаты процесса ректификации

Исследования проводились на примере ректификационной установки для разделения бинарной смеси метанол – вода методом математического моделирования.

Основу математического описания ректификационной колонны составляет математическое описа-

ние процесса массопередачи на отдельной тарелке. С учетом принимаемых допущений [2] при разделении бинарных или псевдобинарных смесей состав которых характеризуется концентрацией только одного компонента, например легколетучего, математическая модель контактного устройства состоит из следующих уравнений:

$$V_i = V_{i-1}, i = 1, 2, \dots, N, \tag{1}$$

$$L_i = \begin{cases} V_{i-1} + U + W, & i \leq N_f \\ V_{i-1} + U - D, & i > N_f, \end{cases} \tag{2}$$

$$x_i = \begin{cases} \frac{V_{i-1} \cdot y_{i-1} + U \cdot x_{i-1} + W \cdot x_0}{V_{i-1} + U + W}, & i \leq N_f \\ \frac{V_{i-1} \cdot y_{i-1} + U \cdot x_{i-1} + W \cdot x_0 - F \cdot x_f}{V_{i-1} + U - D}, & i > N_f, \end{cases} \tag{3}$$

$$y_i = y_{i-1} + (y_i^* - y_{i-1}) \cdot \eta_i, \tag{4}$$

где

$$\eta_i = 1 - \exp\left(\frac{-Ky_i}{V_{i-1}}\right), \tag{5}$$

$$Ky_i = \frac{S_i}{\frac{1}{\beta y_i} + \frac{m_i}{\beta x_i}}, \tag{6}$$

$$m_i = \left(\frac{\partial y^*}{\partial x}\right)_{x=x_i}, \tag{7}$$

$$y_i^* = y^*(x_i), \tag{8}$$

$$\beta_{y_i} = \beta_y(V_{i-1}, Y_{i-1}, L_i, X_i), \tag{9}$$

$$\beta_{x_i} = \beta_x(V_{i-1}, Y_{i-1}, L_i, X_i), \tag{10}$$

$$F = W + D, \tag{11}$$

$$F \cdot x_f = W \cdot x_0 + D \cdot x_{N+1}, \tag{12}$$

$$x_{N+1} = x_d, \tag{13}$$

$$x_0 = x_w, \tag{14}$$

$$L_{N+1} = V_N - D, \tag{15}$$

где  $x_f$  – состав питающей смеси в мольных долях легколетучего компонента в жидкой фазе;  $x_{N+1}$ ,  $x_d$  – состав дистиллята в мольных долях легколетучего компонента;  $x_0$ ,  $x_w$  – состав кубового остатка в мольных долях легколетучего компонента;  $F$  – расход питающей смеси, кмоль/год;  $V$  – расход пара в колонне, кмоль/год;  $x_i$  – состав жидкой фазы на  $i$ -ой тарелке в мольных долях легколетучего компонента;  $y_i$  – состав паровой фазы на  $i$ -ой тарелке в мольных долях легколетучего компонента;  $\eta$  – коэффициент Мерфи, характеризует эффективное действие тарелки по паровой фазе;  $Ky$  – коэффициент массопередачи;  $m$  – значения пер-

вой производной от функции кривого равновесия;  $S$  – эффективная площадь тарелки,  $m^2$ ;  $\beta_x$  – настроечный параметр модели, коэффициент массоотдачи в жидкой фазе,  $кмоль/(m^2 \cdot час \cdot (кмоль/кмоль))$ ;  $\beta_y$  – настроечный параметр модели, коэффициент массоотдачи паровой фазе,  $кмоль/(m^2 \cdot час \cdot (кмоль/кмоль))$ ;  $D$  – величина отбора дистиллята,  $кмоль/час$ ;  $N$  – количество тарелок;  $N_f$  – номер тарелки питания;  $W$  – величина отбора кубового остатка,  $кмоль/час$ ;  $L$  – расход флегмы,  $кмоль/час$ ;  $U$  – величина, которая характеризует унос жидкости с тарелки,  $кмоль/час$ ;  $y^*(x)$  – концентрация легколетучего компонента в паре, равновесному с жидкому составу  $x$ .

Уравнения (11)–(15) – общие уравнения материального баланса, уравнения связи. Граничные условия:

$$0 < x_i < 1, \quad (16)$$

$$0 < y_i < 1, \quad (17)$$

$$0 < D < F, \quad (18)$$

$$0 < W < F, \quad (19)$$

$$0 < N_f < N. \quad (20)$$

В общем случае математическая модель имеет два настроечных коэффициента –  $\beta_y$  и  $\beta_x$ .

Математическое описание конденсатора может быть представлено в виде уравнения:

$$x_D = y_n + (y_n^* - y_n) \cdot \eta_D, \quad (21)$$

где  $\eta_D$  – эффективность дефлегматора;  $0 \leq \eta_D \leq 1$ .

Математическое описание кипятыльника куба колонны может быть представлено в виде уравнения:

$$y_0 = x_0 + (y_0^* - x_0) \cdot \eta_0, \quad (22)$$

где  $\eta_0$  – эффективность кипятыльника;  $0 \leq \eta_0 \leq 1$ .

Считаем, что кипятыльник и конденсатор заполнены полностью,  $\eta_D = \eta_0 = 0$ . Тогда уравнения (21) и (22) принимают вид:  $x_D = y_n$ ,  $y_0 = x_0$ .

Совокупность уравнений (1)–(22) дает полное математическое описание статики ректификационной колонны. Системы уравнений математической модели полностью определены и могут быть решены итерационным методом.

Проверка адекватности предложенной математической модели проводилась путем сравнения данных вычислительных экспериментов с натурными данными.

Для расчета статических характеристик ректификационной колонны использовалась разработанное авторами алгоритмическое и программное обеспечение.

### 5. Результаты исследования статических характеристик каналов управления ректификационных установок с подвижными распределенными регулирующими воздействиями

Результаты исследования статических характеристик ректификационных установок по каналам:

- номер тарелки питания (место ввода сырья) – состав конечного продукта (дистиллята) при различных составах сырья;

- расход паров в колонне – состав конечного продукта;

- номер тарелки питания – концентрационный профиль конечного продукта;

- расход паров в колонне – концентрационный профиль конечного продукта представлен на рис. 1–4.

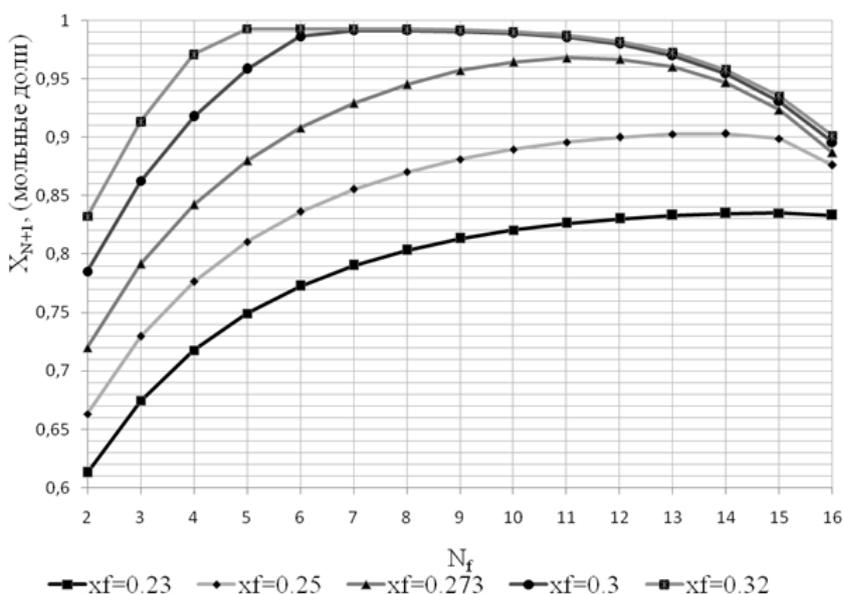


Рис. 1. Зависимость концентрации дистиллята от номера тарелки питания при различных составах сырья

Следует обратить внимание на то, что изменение номера тарелки питания в исчерпывающей части колонны (от  $N_f=2$  до  $N_f=8$ ) характеризуется резким увеличением концентрации конечного продукта, а при изменении тарелки питания в укрепляющей части колонны (от  $N_f=9$  до  $N_f=15$ ) изменение концентрации конечного продукта незначительное. В укрепляющей части колонны концентрация конечного продукта зависит, в значительной степени, от состава сырья.

Необходимо отметить так же, что изменение расхода пара в колонне не приводит к резкому увеличению концентрации конечного продукта, а его изменение в укрепляющей части колонны в большей степени обусловлено изменением состава исходной смеси.

Особенно необходимо отметить то, что подвижные распределенные регулирующие воздействия практически не влияют на концентрационные профили в зоне проектной тарелки питания (от  $N_f=9$  до  $N_f=12$ ).

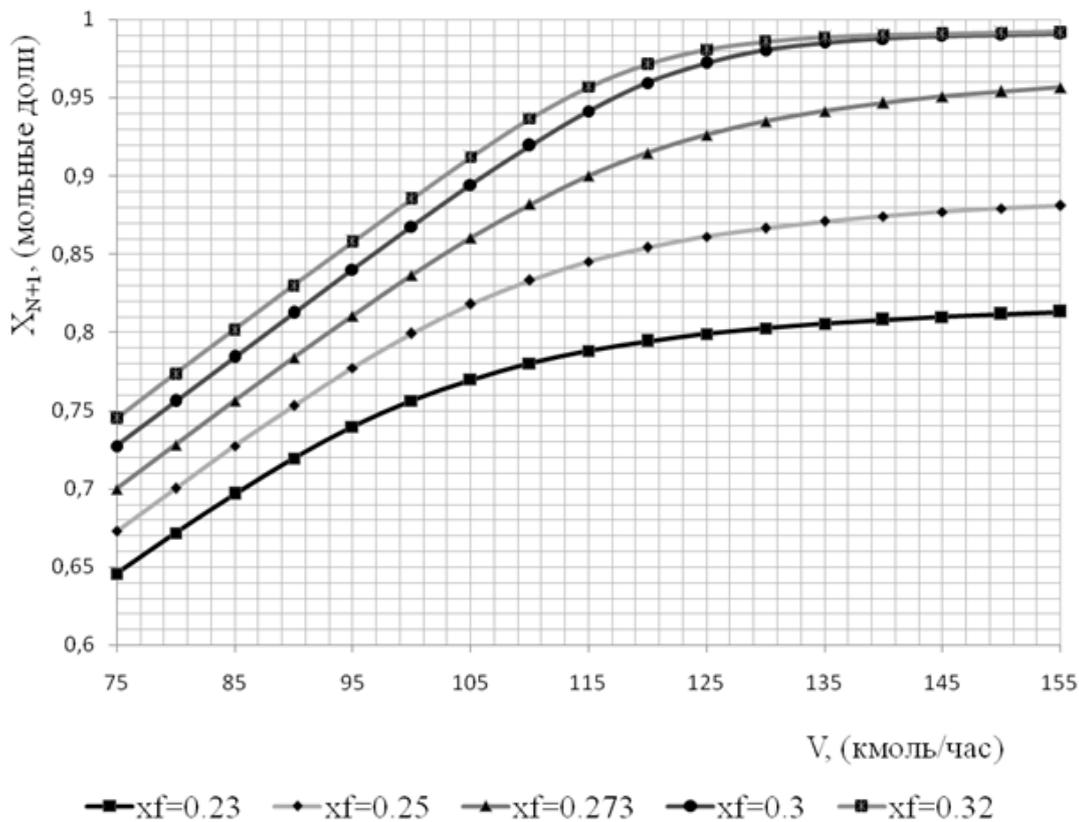


Рис. 2. Зависимость состава дистиллята от расхода паров в колонне при различных составах сырья

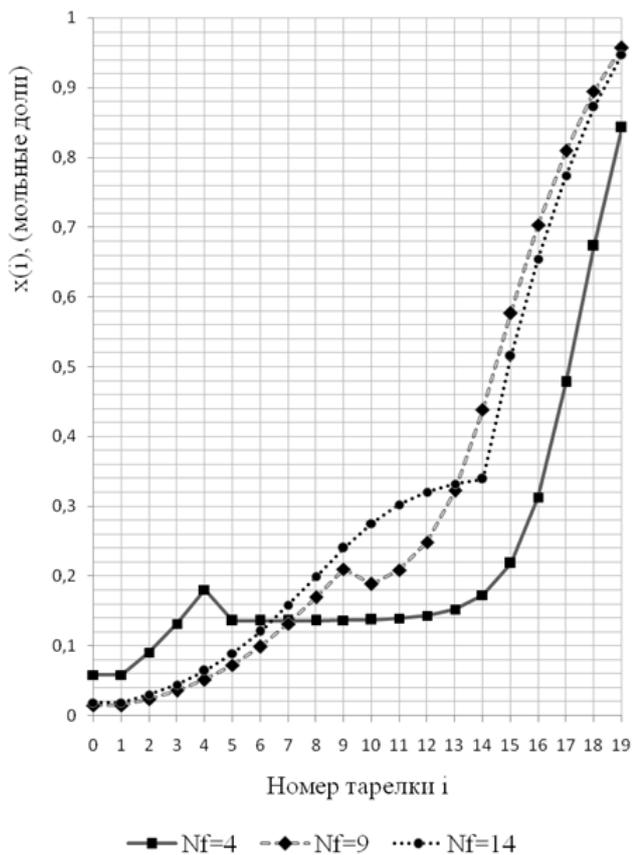


Рис. 3. Зависимость концентрационного профиля легколетучего компонента от номера тарелки питания

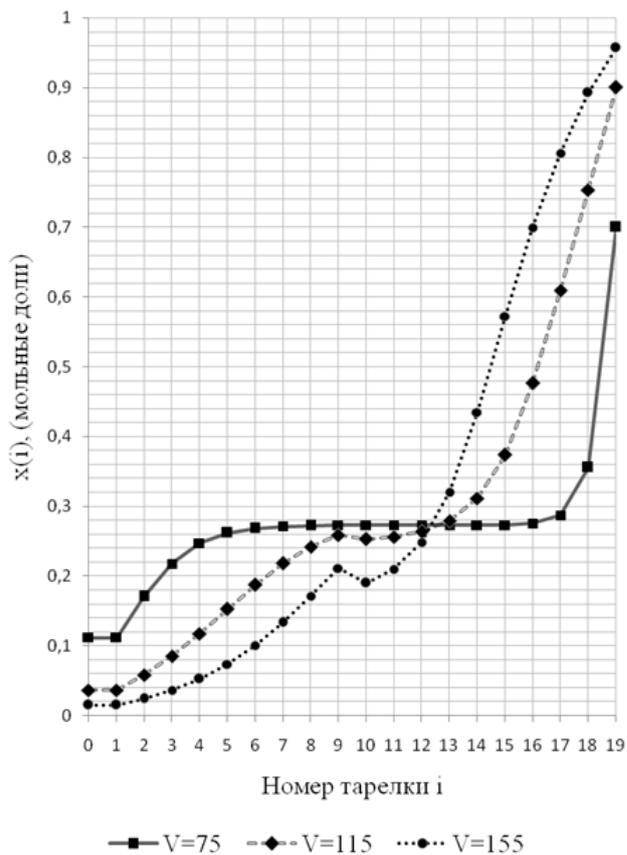


Рис. 4. Зависимость концентрационного профиля легколетучего компонента от расхода паров в колонне

## 6. Обсуждение результатов исследования статических характеристик каналов управления ректификационных установок с подвижными распределенными регулирующими воздействиями

Зависимость концентрации дистиллята от номера тарелки питания (рис. 1) нелинейна и неоднозначна. Вид этой зависимости изменяется при изменении состава питающей смеси и имеет экстремальный характер. Таким образом, очевидно влияние подвижного распределенного регулирующего воздействия, которое заключается в изменении номера тарелки питания, на статический режим работы колонны. Кроме того, зависимость концентрации легколетучего компонента (метанола) на тарелках колонны от места подачи сырья носит экстремальный характер. Значит, для каждого статического режима работы ректификационной колонны, который характеризуется набором независимых переменных, существует номер тарелки питания, при подаче сырья на которую, достигается максимально возможное качество целевого продукта – дистиллята или кубового остатка.

Концентрация дистиллята является основной выходной величиной, которая отражает эффективность ведения процесса ректификации и зависит, так же от расхода паров в колонне. Вид этой зависимости изменяется при изменении состава сырья. С увеличением расхода паров в колонне достигается производство более качественного дистиллята, но это также приводит и к увеличению энергозатрат. Подвижные распределенные регулируемые воздействия оказывают существенное влияние на концентрационные поля низкокипящего компонента

(дистиллята), что позволяет без увеличения энергозатрат на ведение процесса производить целевой продукт заданного качества.

## 7. Выводы

Получена математическая модель процесса ректификации как объекта с сосредоточенными параметрами с учетом кинетики массопередачи, гидродинамики и ограничений по физической реализуемости, которая позволяет определить параметры процесса в паровой и жидкой фазах на всех тарелках колонны путем решения системы уравнений математической модели.

С использованием разработанной математической модели методом имитационного моделирования исследованы статические характеристики ректификационной колонны по каналам:

- номер тарелки питания (место ввода сырья) – состав конечного продукта (дистиллята) при различных составах сырья;
- расход паров в колонне – состав конечного продукта (дистиллята) при различных составах сырья;
- номер тарелки питания – концентрационный профиль конечного продукта;
- расход паров в колонне – концентрационный профиль конечного продукта.

Установлен количественный и качественный характер влияния подвижных распределенных регулируемых воздействий на выходные и фазовые переменные установки ректификации, а так же целесообразность их использования при управлении процессом ректификации.

## Литература

1. Орлов, М. Е. Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен [Текст] / М. Е. Орлов. – Ульяновск: Ул. ГТУ, 2013. – 204 с.
2. Комиссаров, Ю. А. Научные основы процессов ректификации [Текст] / Ю. А. Комиссаров, Л. С. Гордеев, Д. П. Вент. – М.: Химия, 2004. – 316 с.
3. Tajdari, M. Shock-Control Study in Ethyl Acetate Production Process in a Reactive Distillation Column: Experimental and Simulation [Text] / M. Tajdari, M. Ardjmand, M. Soltamieh, A. A. Safekordi // World Applied Sciences Journal. – 2009. – Vol. 7, Issue 5. – P. 574–581.
4. Chandra, P. V. S. R. Multistep model predictive control of ethyl acetate reactive distillation column [Text] / P. V. S. R. Chandra, Ch. Venkateswarlu // Indian Journal of Chemical Technology. – 2007. – Vol. July. – P. 333–340.
5. Minh, V. T. Model predictive control of a condensate distillation column [Text] / V. T. Minh, W. M. W. Muhamad // International Journal of Systems Control. – 2010. – Vol. 1. – P. 4–12.
6. Абрамов, К. В. Разработка инвариантной системы управления процессом ректификации [Текст] / К. В. Абрамов, Ю. Н. Софиева // Приборы. – 2012. – № 3(64). – С. 42–47.
7. Островский, Г. М. Выбор оптимальных тарелок питания в замкнутой системе ректификационных колонн [Текст] / Г. М. Островский, Н. Н. Зиятдинов, Т. В. Лактева // Теоретические основы химической технологии. – 2008. – Т. 42, № 4. – С. 401–412.
8. Подвижное управление тепловыми процессами. Задачи и алгоритмы [Текст] : труды XII Всерос. совещ. / В. А. Кубышкин, В. С. Суховеров, В. И. Финягина // Совещание по проблемам управления. – Москва, 2014. – 58 с.
9. Белоброва, Е. В. Оптимальное управление совмещенными процессами с распределенными управляющими воздействиями. [Текст] : 36. наук. пр. НГУ / Е. В. Белоброва // Днепропетровськ: РВК НГУ. – 2009. – Т. 2, № 33. – С. 48–54.
10. Патент на корисну модель № 88190 Україна. Спосіб керування процесом ректифікації [Текст] / Білоброва О. В., Шейкус А. Р., Корсун В. І. – опубл. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 11.03.2014. – 2 с.