

УДК 665.3:541.8

КОЭФФИЦЕНТЫ НАСЫЩЕНИЯ ПАРОВОЙ ФАЗЫ В УСЛОВИЯХ ДЕЗОДОРАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

© М.Л. Коновалов

Красноярский государственный торгово-экономический институт,
Л. Прушинской, 2, Красноярск, 660075 (Россия)
E-mail: mikhail-konovalov@yandex.ru

На основе математического моделирования исследовано влияние различных факторов на коэффициенты насыщения паровой фазы при дистилляции в токе водяного пара в условиях дезодорации и дистилляционной нейтрализации растительных масел.

Дезодорация растительных масел представляет процесс дистилляции в токе водяного пара. Дистилляция в барботажном слое в токе водяного пара осуществляется в аппаратах периодического и непрерывного действия, в комбинированных аппаратах непрерывного действия, включающих кубовую зону, в аппаратах тарельчатого типа. Таким образом, изучение закономерностей, присущих дистилляции в барботажном слое, весьма актуально.

Практическое использование и детальный анализ выражений, полученных для данного случая на основе балансовых соотношений и уравнений фазового равновесия, возможны лишь в том случае, когда определены коэффициенты насыщения паровой фазы переходящими компонентами.

Известные соотношения для коэффициентов насыщения при дистилляции в слое [1, 2, 4] получены путем интегрирования уравнения массопередачи. При этом равновесная концентрация считается постоянной по высоте слоя жидкости. Это не позволяет учесть фактор переменности гидростатического давления в барботажном слое.

Попытка учесть указанный фактор сделана Ригамонти и Джинанетто [5]. Однако полученные ими соотношения не обладают достаточной общностью, так как справедливы лишь для пузырькового режима барботажа (не самого эффективного с точки зрения интенсивности массопереноса).

Критериальные уравнения Сийрде [3] для коэффициента насыщения при различных режимах барботажа ограничиваются высотой барботажного слоя – 60 мм. Возникают сомнения, что увеличение высоты барботажного слоя выше 60 мм не эффективно.

С учетом сказанного предпринята попытка получения достаточно общих соотношений для расчета коэффициентов насыщения паровой фазы переходящими компонентами при дистилляции в условиях барботажа острого пара через слой жидкости с учетом переменности гидростатического давления по высоте барботажного слоя.

Для построения математической модели в данных условиях приняты следующие исходные соотношения.

Уравнение равновесия жидкой и паровой фаз:

$$y = \frac{P_A}{P} \cdot x. \quad (1)$$

Уравнение, характеризующее распределение давлений по высоте барботажного слоя:

$$P = P_0 + \rho \cdot g \cdot h. \quad (2)$$

Уравнение материального баланса по переходящему компоненту:

$$G \cdot (x_{\text{ex}} - x) = L \cdot y_{\kappa}. \quad (3)$$

Кинетическое уравнение отгонки:

$$dy = \beta \cdot (x - x_p) \cdot d\tau. \quad (4)$$

Здесь приняты следующие обозначения: y, y_{κ} – мольные концентрации переходящего компонента в паровой фазе (текущая и конечная соответственно); P_0, P, P_A – давления: над поверхностью жидкости в аппарате, в барботажном слое: паров чистого переходящего компонента при температуре дистилляции соответственно; x, x_{ex}, x_p – мольные концентрации переходящего компонента в жидкой фазе: средняя по кубовой зоне, на входе в куб, равновесная (соответственно); ρ – плотность жидкой фазы; g – ускорение свободного падения; h – расстояние от поверхности жидкости до рассматриваемой точки в глубине слоя; β – кинетический коэффициент отгонки; τ – время; G, L – мольные расходы жидкости и острого пара в кубе.

Решение системы (1)–(4) получено в следующем безразмерном виде:

$$\varphi(\bar{h}) = \sqrt{\pi} \cdot C \cdot \exp(C^2) \cdot \exp(2 \cdot K_A \cdot K_{\tau H} \cdot \bar{h} + A^2 \cdot \bar{h}^2) \times \\ \times \frac{\operatorname{erf}(A+C) - \operatorname{erf}(A \cdot \bar{h} + C)}{I + K_{\mu} \left(\sqrt{\frac{\pi \cdot K_H \cdot K_{\tau H}}{K_A}} \cdot \exp(C^2) \cdot (\operatorname{erf}(A+C) - \operatorname{erf}(C)) \right)}, \quad (5)$$

$$\varphi_{\kappa} = K_A \cdot \left(\left(\sqrt{\frac{\pi \cdot K_H \cdot K_{\tau H}}{K_A}} \cdot \exp(K_A \cdot K_H \cdot K_{\tau H}) \cdot \left(\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{K_A \cdot K_{\tau H}}{K_H}} + \sqrt{K_A \cdot K_H \cdot K_{\tau H}}\right) - \operatorname{erf}(\sqrt{K_A \cdot K_H \cdot K_{\tau H}}) \right) \right)^{-1} + K_{\mu} \right)^{-1}. \quad (6)$$

Здесь введены следующие безразмерные величины:

$$K_A = \frac{P_0}{P_A}; \quad K_H = \frac{P_0}{\Delta P}; \quad K_{\tau H} = \frac{\beta \cdot H}{2 \cdot w} = \frac{\beta \cdot \tau_H}{2}; \quad K_{\mu} = \frac{L}{G}; \quad \bar{h} = \frac{h}{H}; \\ \varphi(\bar{h}) = \frac{y}{y_{\text{ex},p}}; \quad \varphi_{\kappa} = \frac{y_{\kappa}}{y_{\text{ex},p}}; \quad A = \sqrt{\frac{K_A \cdot K_{\tau H}}{K_H}}; \quad C = \sqrt{K_A \cdot K_H \cdot K_{\tau H}}.$$

При этом: H – высота слоя жидкости; w – средняя скорость прохождения пара через барботажный слой; τ_H – время прохождения пара через барботажный слой; ΔP – перепад давлений по высоте слоя; $y_{\text{ex},p}$ – концентрация переходящего компонента в паровой фазе, равновесная концентрации x_{ex} в жидкости.

сти; $erf(z) = \frac{2}{\pi} \int_0^z \exp(-t^2) \cdot dt$ – интеграл вероятности; y_k – конечная мольная концентрация переходящего компонента в паровой фазе.

Величина $\varphi(\bar{h})$ является функцией координаты (высоты барботажного слоя) и характеризует коэффициент насыщения паровой фазы переходящим компонентом в произвольном сечении по высоте барботажного слоя. Величина φ_k характеризует коэффициент насыщения паровой фазы переходящим компонентом у поверхности барботажного слоя.

Несмотря на то, что одно из исходных соотношений – уравнение материального баланса (3) – отражает специфику непрерывного процесса, полученные результаты могут быть использованы и для периодической дистилляции в слое. Для этого достаточно в выражениях (5) и (6) принять K_μ равным нулю. Соотношения (5) и (6) позволяют рассчитать коэффициент насыщения паровой фазы переходящим компонентом по мере прохождения пара через барботажный слой и на его поверхности соответственно. Рассчитанный таким образом коэффициент насыщения паровой фазы может быть использован в соответствующих моделях периодической или непрерывной дистилляции, полученных на основе балансовых соотношений и уравнений фазового равновесия.

Полученные результаты, строго говоря, справедливы для двухкомпонентной системы при малом содержании переходящего компонента в жидкой и паровой фазе. Однако если предположить, что в многокомпонентной системе суммарное содержание всех переходящих компонентов как в жидкой, так и в паровой фазе мало, то уравнения аналогичные (5) и (6) могут быть записаны для каждого компонента многокомпонентной системы. Таким образом, может быть предложена математическая модель дистилляции в барботажном слое для многокомпонентных систем.

Данная математическая модель может рассматриваться и как самостоятельная (непрерывная или периодическая дистилляция в кубе), и как часть математической модели комбинированного аппарата непрерывного действия, включающего кубовую зону, а также как модель дистилляции в тонком слое (на тарелке). Это говорит о высокой степени универсальности полученных результатов.

Исследуем влияние различных факторов на коэффициент насыщения паровой фазы переходящим компонентом в условиях дистилляции в барботажном слое в токе водяного пара.

В случае периодического процесса ($K_\mu = 0$) выражение (6) приобретает следующий вид:

$$\varphi_k = \sqrt{\pi \cdot K_A \cdot K_H \cdot K_{th}} \cdot \exp(K_A \cdot K_H \cdot K_{th}) \cdot \left[\begin{aligned} & \text{erf}\left(\sqrt{\frac{K_A \cdot K_{th}}{K_H}} + \sqrt{K_A \cdot K_H \cdot K_{th}} \right) \\ & - \text{erf}\left(\sqrt{K_A \cdot K_H \cdot K_{th}} \right) \end{aligned} \right]. \quad (7)$$

Область малых значений k_h (k_h от 0,01 до 0,1)

Относительно малые K_H значения соответствуют относительно большому перепаду давлений по толщине барботажного слоя (перепад давлений в барботажном слое значительно больше давления в аппарате).

Примем K_H , а в качестве параметра в выражении (7), а произведение $K_H \cdot K_A \cdot K_{th}$ – в качестве переменной. Обозначим его B . Выражению (7) в данном случае можно придать следующий вид:

$$\varphi_k = \sqrt{p \cdot B} \cdot \exp(B) \cdot \left[\text{erf}\left(\sqrt{\frac{B}{K_H^2}} + \sqrt{B} \right) - \text{erf}(\sqrt{B}) \right]. \quad (8)$$

Построим графические зависимости коэффициента насыщения паровой фазы от B при постоянстве K_H (рис. 1 и 2). Рисунок 2 детализирует закономерности в области малых значений B .

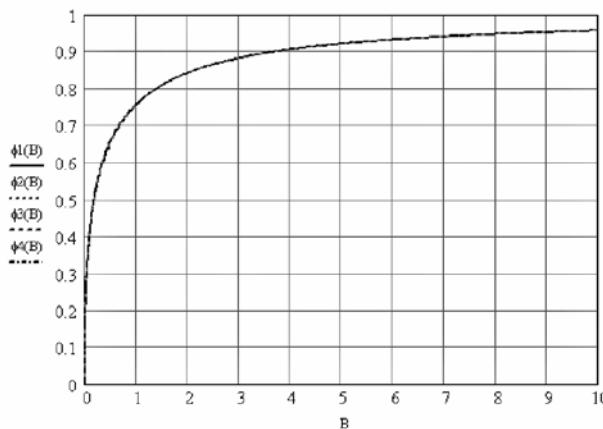


Рис. 1. Зависимости коэффициентов насыщения паровой фазы $\varphi_1(B)$, $\varphi_2(B)$, $\varphi_3(B)$, $\varphi_4(B)$ от переменной B при $K_H = 0,01, 0,02, 0,05, 0,1$ соответственно

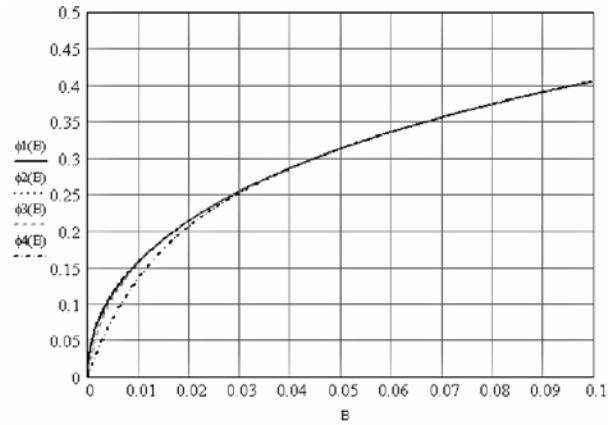


Рис. 2. Зависимости коэффициентов насыщения паровой фазы $\varphi_1(B)$, $\varphi_2(B)$, $\varphi_3(B)$, $\varphi_4(B)$ от переменной B (область малых значений B) при $K_H = 0,01; 0,02; 0,05; 0,1$ соответственно

Как следует из графиков, в области $B > 0,03$ для рассматриваемого диапазона K_H существует единая кривая для коэффициента насыщения паровой фазы. В данном случае значения B могут служить критериями достижения как относительно высоких коэффициентов насыщения паровой фазы, так и относительно низких коэффициентов насыщения в указанном диапазоне K_H . Относительно высокие значения коэффициентов насыщения наблюдаются при $B \geq 1$. При этом коэффициент насыщения паровой фазы выше 0,75. Относительно низкий коэффициент насыщения паровой фазы (около 0,25 и ниже) наблюдается при $B \leq 0,03$.

Область высоких значений k_h ($k_h \geq 5$)

Это соответствует относительно небольшому перепаду давлений в барботажном слое по сравнению с давлением в аппарате. Следовательно, процесс массопереноса в барботажном слое идет практически при постоянном давлении, близком к давлению в аппарате (над поверхностью жидкости).

Графические зависимости, соответствующие данному случаю, представлены на рисунке 3. Из рисунка видно, что кривые практически сливаются во всем диапазоне возможных коэффициентов насыщения, если в качестве аргумента принять $K_{at} = K_A \cdot K_{tH}$.

Таким образом, значения K_{at} могут служить критериями достижения как относительно высоких коэффициентов насыщения паровой фазы, так и относительно низких коэффициентов насыщения. Относительно высокие значения коэффициентов насыщения наблюдаются при $K_{at} \geq 0,75$. При этом коэффициент насыщения паровой фазы выше 0,75. Относительно низкий коэффициент насыщения паровой фазы (около 0,25 и ниже) наблюдается при $K_{at} \leq 0,15$.

Область значений k_h от 0,2 до 2,5

В данном случае перепад давлений по барбатажному слою соизмерим с давлением в аппарате (над поверхностью жидкой фазы).

На рисунках 4 и 5 представлены зависимости коэффициента насыщения в указанном диапазоне K_H от аргументов K_{at} и B соответственно.

Для определения области относительно низких коэффициентов насыщения удобнее использовать критерий K_{at} . Так же, как и в предыдущем случае, если $K_{at} \leq 0,15$, значения коэффициента насыщения меньше 0,25. В качестве критерия относительно высоких значений коэффициента насыщения удобнее использовать B . Коэффициент насыщения достигает значений 0,75 и выше при $B \geq 2$.

Графики, представленные на рисунках 1–4, могут быть использованы для определения коэффициентов насыщения паровой фазы переходящим компонентом в широком диапазоне переменных K_{tH} , и B при различных значениях параметра K_H .

Основные результаты и выводы по данному разделу удобнее представить в табличной форме (см. табл.).

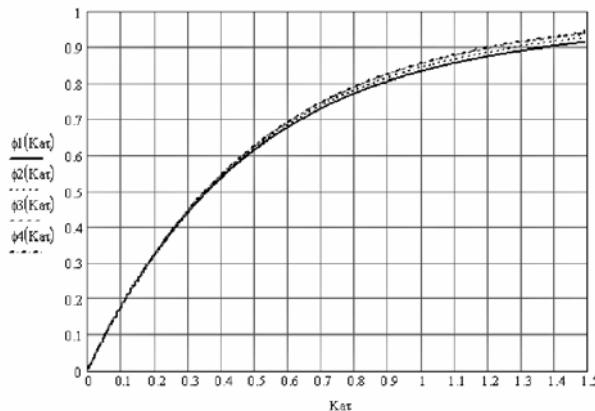


Рис. 3. Зависимости коэффициентов насыщения паровой фазы $\varphi_1(K_{at})$, $\varphi_2(K_{at})$, $\varphi_3(K_{at})$, $\varphi_4(K_{at})$ от переменной K_{at} при $K_H = 5, 8, 15, 20$ соответственно

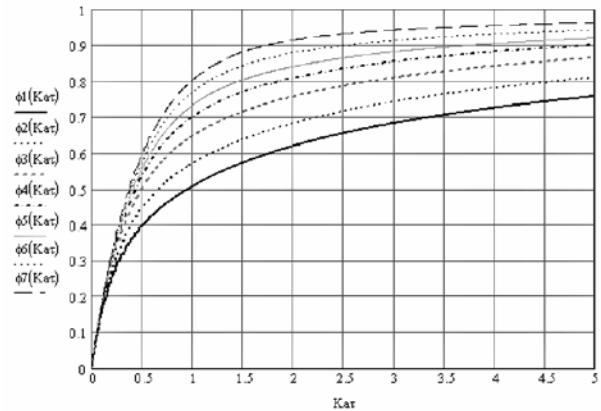


Рис. 4. Зависимости коэффициентов насыщения паровой фазы $\varphi_1(K_{at})$, $\varphi_2(K_{at})$, $\varphi_3(K_{at})$, $\varphi_4(K_{at})$, $\varphi_5(K_{at})$, $\varphi_6(K_{at})$, $\varphi_7(K_{at})$ от переменной K_{at} при $K_H = 0,2; 0,3; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5$ соответственно

Результаты анализа зависимостей коэффициента насыщения паровой фазы от аргументов K_{at} и B при постоянстве K_H

Диапазон значений параметра $-K_H$	Область относительно высоких значений коэффициентов насыщения – 0,75 и выше при	Область относительно низких значений коэффициентов насыщения – 0,25 и ниже при	Дополнительная информация и особенности в указанном диапазоне значений параметра K_H
$0,01 \geq K_H \geq 0,1$	$B \geq 1$	$B \leq 0,03$	При $B \geq 0,03$ имеет место единственная кривая
$K_H \geq 5$	$K_{at} \geq 0,75$	$K_{at} \leq 0,15$	Во всем диапазоне K_{at} имеет место единственная кривая
$0,2 \leq K_H \leq 2,5$	$B \geq 2$	$K_{at} \leq 0,15$	При $B > 4$ имеет место единственная кривая

Общим выводом для всех случаев, когда в качестве параметра используется K_H , является то, что при любом значении параметра K_H существуют такие значения аргументов K_{at} или B , при которых коэффициент насыщения приближается к максимально возможному значению – единице. Существуют также такие значения аргументов K_{at} или B , при которых коэффициент насыщения приближается к нулевому значению.

Представляет интерес изучить влияние высоты барботажного слоя на коэффициент насыщения. В данном случае в качестве переменной целесообразно выбрать безразмерную величину пропорциональную высоте барботажного слоя. Примем $K_h = 1/K_H$ в качестве переменной в выражении (7), а величину B – в качестве параметра.

Построим графические зависимости коэффициента насыщения паровой фазы от K_h при различных значениях B (рис. 6).

Общим для всех кривых является то, что при заданном B по мере роста K_h коэффициент насыщения паровой фазы монотонно возрастает, стремясь к некоторому максимально возможному для данного B значению. С увеличением B растут максимально возможные коэффициенты насыщения.

Если в качестве переменной вместо K_h принять величину $X = K_h \cdot \sqrt{B}$, то графические зависимости примут вид, изображенный на рисунке 7.

Характерным для данного графика является то, что в широком диапазоне B момент достижения максимального значения коэффициентов насыщения происходит при очень близких значениях X (при $X = 2$ для $B = 0,02$; при $X = 1$ для $B = 12,5$). Таким образом, с достаточно высокой степенью точности можно утверждать, что максимально возможные значения коэффициентов насыщения в широком диапазоне B достигаются при X , близком к 1,5. Это значение X можно расценивать как критерий достижения максимально возможного значения коэффициента насыщения паровой фазы в широком диапазоне значений параметра B .

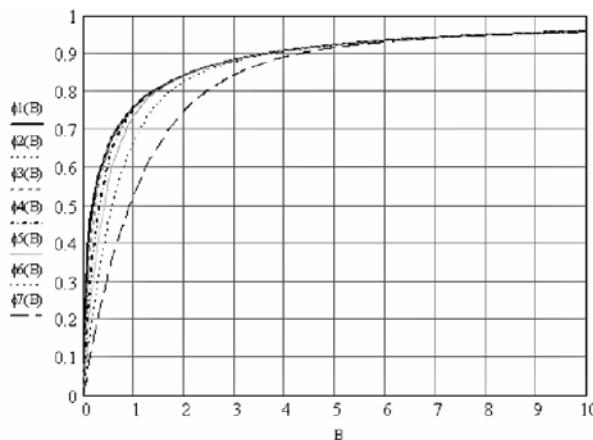


Рис. 5. Зависимости коэффициентов насыщения паровой фазы $\varphi_1(B)$, $\varphi_2(B)$, $\varphi_3(B)$, $\varphi_4(B)$, $\varphi_5(B)$, $\varphi_6(B)$, $\varphi_7(B)$ от переменной B при $K_H = 0,2; 0,3; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5$ соответственно

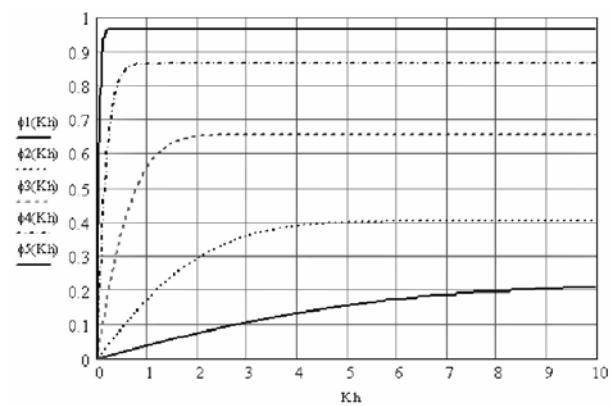


Рис. 6. Зависимости коэффициентов насыщения паровой фазы $\varphi_1(Kh)$, $\varphi_2(Kh)$, $\varphi_3(Kh)$, $\varphi_4(Kh)$, $\varphi_5(Kh)$ от переменной Kh при различных значениях B ($B1=0,02$, $B2=0,1$, $B3=0,5$, $B4=2,5$, $B5=12,5$)

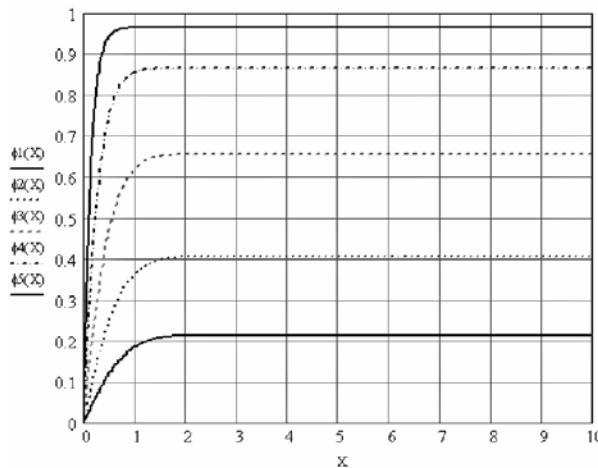


Рис. 7. Зависимости коэффициентов насыщения паровой фазы $\varphi_1(X)$, $\varphi_2(X)$, $\varphi_3(X)$, $\varphi_4(X)$, $\varphi_5(X)$ от переменной X при различных значениях B ($B1=0,02$, $B2=0,1$, $B3=0,5$, $B4=2,5$, $B5=12,5$)

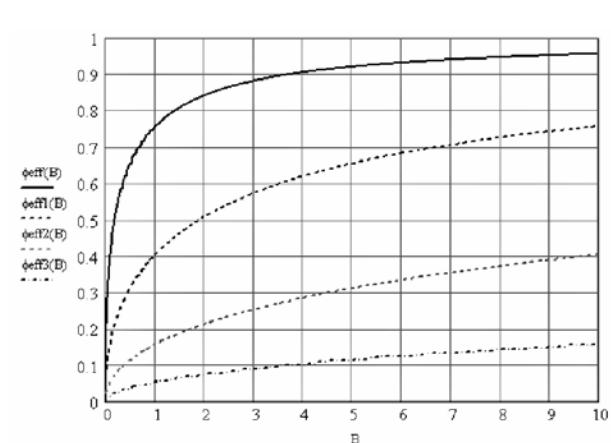


Рис. 8. Зависимости эффективных коэффициентов насыщения от переменной B . $\varphi_{eff}(B)$ соответствует диапазону изменения B от 0 до 10; а $\varphi_{eff}1(B)$ – диапазону изменения B от 0 до 1, $\varphi_{eff}2(B)$ – от 0 до 0,1; $\varphi_{eff}3(B)$ – от 0 до 0,01

Максимально возможные значения коэффициентов насыщения при заданном значении B предлагается называть эффективными коэффициентами насыщения. Численные же значения высот барботажного слоя, соответствующие эффективным коэффициентам насыщения, – эффективными высотами барботажного слоя.

На рисунке 8 представлены зависимости эффективных коэффициентов насыщения от B . Таким образом, рисунок 8 позволяет обобщить результаты исследования (применительно к максимально возможным в данных условиях коэффициентам насыщения) по существу единой графической зависимостью.

Список литературы

1. Beyly A.F. Industrial production of oil and fat. 1951. P. 767–768, 897–913.
2. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М., 1981. 812 с.
3. Сийрде Э.К. Дистилляция. М., 1971. 216 с.
4. Стабиков В.Н., Попов В.Д., Лысянский В.М., Редько Ф.А. Процессы и аппараты пищевых производств. М., 1976. 664 с.
5. Rigamonti R., Gianetto A. International Symposium on Distillation. Brighton, 1960.

Поступило в редакцию 17 ноября 2005 г.