

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ФЛЕГМИ ДЛЯ РЕКТИФІКАЦІЙНОЇ КОЛОНИ ЦИКЛІЧНОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ ТА ПОРІВНЯННЯ ЙОГО ІЗ СТАЦІОНАРНИМ

О. Ю. Шевченко, О. В. Бедрик

Національний університет харчових технологій

В. М. Малета

Maleta Cyclic Distillation LLC OÜ, Parnu mnt 130-38, 11317 Tallinn, Estonia

Останнім часом зросло виробництво та використання біопалива, яке практично не поступається бензину. Відомо, що більше 50% спирту використовується з технічною метою. Проведені експериментальні дослідження в галузі дистиляції етанолу показують, що процес розділення компонентів має значний потенціал. Як механізм інтенсифікації процесу на шляху підвищення ефективності масообмінного обладнання, наприклад ректифікаційної колони, успішно використовується метод циклічної дистиляції з роздільним рухом фаз. Проведення кількісного порівняння традиційного режиму дистиляції з циклічним було здійснене за допомогою математичного моделювання обох режимів, при якому відображався взаємозв'язок між основними параметрами процесу.

Для визначення оптимального співвідношення між капітальними та поточними витратами використовується оптимальне значення флегмового числа як мінімуму функціональної залежності умовного об'єму колони від флегмового числа. Із збільшенням флегмового числа зменшується кількість тарілок і відбувається перерозподіл співвідношення кількості тарілок у вичерпній і концентраційній частинах колони. За результатами математичного моделювання ректифікаційної колони, при виробництві біоетанолу, за умови концентрації дистиляту 95% об. та концентрації живлення 10% об. отримана залежність кількості тарілок колони від величини флегмового числа. Оптимальне флегмове число для циклічної дистиляції на 25% менше за загальноприйняте, при умовно-му об'ємі колони в 2,2 раза менше для циклічної дистиляції. Економічний ефект від підвищення ефективності розділення циклічної дистиляції перерозподіляється між економією пари та кількістю тарілок ректифікаційної колони. Розрахунки показали максимальну економію пари до 30% при зменшенні кількості тарілок в 1,5 раза та відсутність економії пари при зменшенні кількості тарілок в 2,6 раза.

Ключові слова: циклічна дистиляція, ректифікаційна колона, оптимальне флегмове число, біоетанол, математичне моделювання.

Постановка проблеми. Проектування масообмінних колонних апаратів зводиться до визначення їхніх технологічних і конструктивних характеристик. Для визначення оптимального співвідношення між капітальними та поточними витратами визначається оптимальне значення флегмового числа як мінімуму функціональної залежності умовного об'єму колони від флегмового числа [2].

Проведені експериментальні дослідження дистиляції показують, що процес розділення, який проводиться традиційним методом, не дає повністю розкрити можливості установки при розділенні бінарної суміші [5]. Для підвищення ефективності масообмінного обладнання в останні роки успішно використовується метод циклічної дистиляції з роздільним рухом фаз. Циклічна дистиляція продемонструвала обнадійливі результати як при виробництві біоетанолу, так і при виробництві харчового спирту [3; 4; 6]. Промислове впровадження технології циклічної дистиляції стає можливим при демонстрації переваг останньої при порівнянні обох режимів. Для цього було проведено математичне моделювання, де отримав своє відображення взаємозв'язок і співвідношення між основними параметрами обох режимів, що слугує надійним фундаментом для розкриття сутності та розуміння причин збільшення ефективності розділення для циклічної дистиляції.

Мета дослідження: проведення кількісного порівняння традиційного режиму дистиляції з циклічним за допомогою математичного моделювання обох режимів, при якому відображався б взаємозв'язок між основними параметрами процесу.

Матеріали і методи. В основі математичної моделі бінарної суміші «етанол-вода» лежить коміркова модель В. М. Малети [1], яка надає можливість дослідити масообмінні процеси в колонних апаратах. Об'єктом математичного моделювання обрали ректифікаційну колону, як один із елементів технологічного процесу при виробництві біоетанолу. Заданий діапазон параметрів ректифікаційної колони становить: продуктивність заводу 3000 дал/добу; концентрація живлення 10% об., концентрація дистиляту на виході з колони 95% об., втрата етанолу з лютером — 0,015% об. Мінімальне число флегми становить $R_{\min}=2,5$. Колона працює при атмосферному тиску. Результати моделювання представлені в табл. 1, де N визначає кількість теоретичних тарілок циклічної дистиляції, причому дріб показує співвідношення вичерпної внизу та концентраційної зверху частин ректифікаційної колони. Розрахунки циклічної дистиляції проводили числовими методами, а традиційної дистиляції — графічним. Зображення обох процесів у координатах Y — X показано на рис. 1, 2, 3.

Таблиця 1. Результати моделювання ректифікаційної колони

Концентрація дистиляту — 95% об. Концентрація живлення — 10% об. $R_{\min}=2,5$													
N	$18 \frac{8}{10}$	$17 \frac{8}{9}$	$16 \frac{7}{9}$	$15 \frac{7}{8}$	$14 \frac{7}{7}$	$13 \frac{6}{7}$	$12 \frac{6}{6}$	$11 \frac{6}{5}$	$10 \frac{5}{5}$	$9 \frac{5}{4}$	$8 \frac{5}{3}$	$7 \frac{5}{2}$	$6 \frac{4}{2}$
R	2,53	2,55	2,6	2,7	2,8	2,95	3,2	3,6	4,4	4,9	6,5	9,4	13,2

Результати і обговорення. Максимально можливу інтерпретацію результатів розрахунків зіставлених процесів зображено на рис. 1 в координатах $N = f(R)$, на

рис. 2 — в координатах $N(R+1) = f(R)$, на рис. 3 — в координатах $1 - (R_{CD}+1)/(R_{TS}+1) = f(R)$. При цьому індекси CD відносяться до циклічної дистиляції, а TS — до традиційної дистиляції, $N(R+1)$ — це умовний об'єм колони або величина капітальних витрат на її виготовлення, $R_{TS}+1$ — витрата пари стаціонарного процесу, $R_{CD}+1$ — витрата пари циклічного процесу, $1 - (R_{CD}+1)/(R_{TS}+1)$ — економія пари (в частках) для циклічного процесу.

Рис. 1 є базовим [2]. Для циклічного режиму крива залежності теоретичних тарілок від флегми проходить значно нижче, ніж для стаціонарного режиму. Визначення $R_{\text{опт}}$ для обох режимів показано на рис. 2. Крім того, що умовний об'єм колони $N(R+1)$ зменшений у декілька разів, оптимальне значення $R_{\text{опт}}$ зміщене в бік менших величин на 25%.

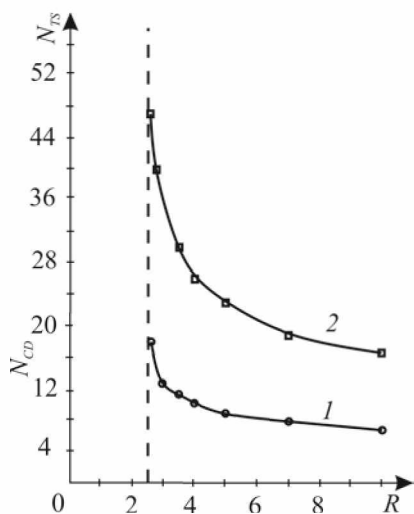


Рис. 1. Залежності теоретичних тарілок N від величини флегми R для дистиляту концентрації 95% об.:
 крива 1 відноситься до теоретичних тарілок циклічної дистиляції;
 крива 2 — до теоретичних тарілок традиційної дистиляції

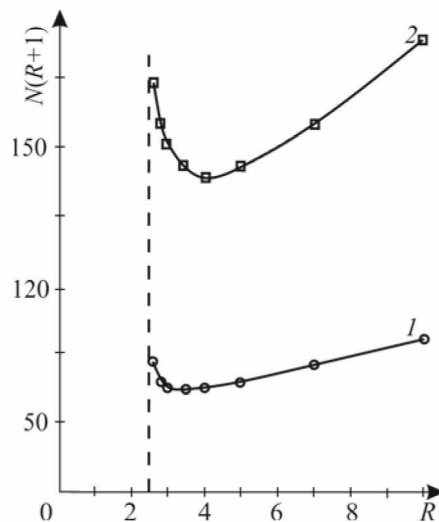


Рис. 2. Визначення оптимального флегмового числа:
 крива 1 — циклічний процес; крива 2 — стаціонарний процес

Як показали попередні розрахунки, збільшення ефективності розділення компонентів для циклічної дистиляції виражається через зменшення енерговитрат і зменшення кількості тарілок. На рис. 3 зображено кількісний, обернено пропорційний зв'язок між цими величинами залежно від величини флегмового числа.

Ліва вісь графіка є функцією відносного зменшення витрати пари для циклічної дистиляції, $1 - (R_{CD}+1)/(R_{TS}+1) = f(R)$, лінія — 1. Права вісь графіка — функція відношення кількості тарілок стаціонарного процесу до циклічного $N_{TS}/N_{CD} = f(R)$, лінія — 2.

Сукупність цих двох закономірностей показує можливі варіанти числових співвідношень перерозподілу результатів підвищення ефективності циклічного

процесу між кількістю тарілок та економією пари при різних варіантах роботи апарата. Наприклад: у діапазоні зміни флегми від 2,5 до 4 кількості пари зменшується від нуля до 30%, при зменшенні кількості тарілок в 2,5 раза без економії пари та при зменшенні кількості тарілок у 1,5 раза при економії пари в 30%. Для фіксованого флегмового числа 3,5 кількість пари зменшується на 10%, а кількість тарілок в 2,3 раза.

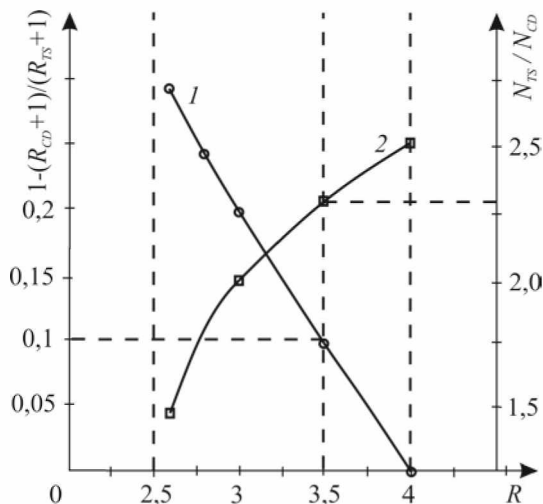


Рис. 3. Залежність критеріїв ефективності циклічного процесу з економії витрати пари та зменшення кількості тарілок від величини флегми:

лінія 1 — крива економії витрати пари;

лінія 2 — крива відношення кількості тарілок стаціонарного процесу до циклічного

Висновки

За результатами математичного моделювання ректифікаційної колони, при виробництві біоетанолу, за умови концентрації дистиляту 95% об. та концентрації живлення 10% об. отримана залежність кількості тарілок колони від величини флегмового числа. Тенденції впливу технологічних параметрів на роботу колони не змінюються порівняно з традиційною дистиляцією. Із збільшенням флегмового числа зменшується кількість тарілок і відбувається перерозподіл співвідношення кількості тарілок у вичерпній та концентраційній частинах колони. При цьому суттєвим показником підвищення ефективності циклічного процесу є загальна кількість тарілок, яка в 1,5—2,5 раза менша за стаціонарний.

Економія енергетичних витрат, при порівнянні обох режимів, демонструє оптимальне значення числа флегми. Оптимальне флегмове число для циклічної дистиляції на 25% менше за загальноприйняте при умовному об'ємі колони в 2,2 раза менше для циклічної дистиляції.

Перерозподіл ефективності циклічної дистиляції між економією пари та кількістю тарілок у ректифікаційній колоні показав значення економії пари від 0 до 30% для кількості тарілок від 2,6 до 1,5 раза менше за відповідне значення економії пари.

ЛІТЕРАТУРА

1. Малета В. Н. Интенсификация процесса массообмена при циклической работе аппаратов пищевых производств. Дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1988. 172 с.
2. Цыганков П. С. Ректификационные установки спиртовой промышленности. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 336 с.
3. Kiss A. A. Cyclic distillation — towards energy efficient binary distillation / Anton A. Kiss, Servando J. Flores Landaeta and Edwin Zondervan // Proceedings of the 22nd European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 17—20 June 2012, London.
4. Lancer I., Kummel M. Hydrodynamic model of controlled cycling in tray columns. *Chem. Eng. Science*. 1979. V. 34. P. 455—462.
5. Levis W. K. Rectification of binary mixtures. *Ind. Eng. Chem.* 1936. V. 28, № 4. P. 399—402.
6. Maleta B. Pilot-Scale Studies of Process Intensification by Cyclic Distillation / B. Maleta, A. Shevchenko, O. Bedryk, A. Kiss. *Chemical Engineers AIChE Journal*, 61: 2581—2591, 2015.