
АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 66.048:541.123.7:621.391

БУГАЄВА Л. М., БЕЗНОСИК Ю. О.*
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕВРИСТИЧНА ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗУ СИСТЕМИ ПОДІЛУ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШЕЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Практично в будь-якому хімічному процесі має місце розділення багатокомпонентних сумішей, для чого мають бути обрані методи поділу і встановлена послідовність етапів поділу за умов великої кількості варіантів рішення. На цей час пропонується низка методів синтезу процесів розділення, але кожного разу виникає питання щодо ефективності обраного методу. В представленій роботі пропонується застосувати евристичний підхід із використанням нечіткої логіки, і на прикладі показано його ефективність.

Ключові слова: розділення, багатокомпонентна суміш, послідовність поділу, евристичні правила, нечітка логіка.

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2022.254158

*Corresponding author: yu_beznosyk@ukr.net

Received 28 September 2021; Accepted 16 December 2021

Постановка проблеми. За останні десятиліття для проектування, моделювання, оптимізації і управління складних хіміко-технологічних об'єктів знайшли широке застосування інтелектуальні засоби. Використання методів штучного інтелекту та новітніх комп'ютерних технологій дозволяє змінити традиційні методи моделювання, а також створювати нові. Метою даної роботи є розробка процедури моделювання процесів поділу речовин і синтезу схем поділу багатокомпонентних сумішей із використанням евристичного методу на основі фази-логіки.

Аналіз попередніх досліджень. Більшість хімічних процесів включають поділ багатокомпонентних хімічних сумішей. Загалом, поділ вимагає декількох етапів, на кожному з яких відбувається поділ потоку на два. Загальною науковою проблемою є те, що для багатокомпонентних сумішей мають бути обрані методи поділу і встановлена послідовність етапів поділу найкращим чином серед великої кількості варіантів рішення. Авторами було розглянуто сучасний стан існуючих методів поділу речовин [1-11]. Аналіз розглянутих методів показав, що багато робіт присвячених синтезу ефективних систем поділу залишають невирішеною частиною наукової проблеми врахування невизначенності багатьох чинників таких систем, що не знімає актуальності розроблення нових ефективних підходів до моделювання конкретних послідовностей розділення.

Метою статті є показати можливість використання евристичної процедури, що базується на теорії нечітких множин, для рішення задачі пошуку найкращих варіантів систем розділення багатокомпонентних сумішей.

Виклад основного матеріалу.

Авторами спершу були розглянуті існуючі методи поділу речовин [3]. Коротко вони представлені у таблиці 1. При цьому вважається, що вхідний потік є однофазним, а якщо це не так, то необхідно провести механічний поділ на окремі фази.

Аналіз розглянутих джерел [8-14] показав необхідність в модифікації існуючих або реалізації нових підходів для моделювання конкретних послідовностей розділення.

Пропонована процедура заснована на виборі послідовності поділу об'єднуючої величини коефіцієнта поділу α і різниці температур кипіння двох суміжних ключових компонентів у зазначеному списку, як визначено в [12].

Таблиця 1 – Загальні промислові методи поділу

Метод поділу	Фаза потоку живлення	Фактор (речовина) поділу	Додаткова фаза	Принцип поділу
Рівноважний випар	Рідина і/або пара	Зниження тиску чи теплообмін	Пара або рідина	Відмінність летючості
Дистиляція	Рідина і/або пара	Теплообмін чи робота турбіни	Пара або рідина	Відмінність летючості
Газова абсорбція	Пара	Рідкий абсорбент	Рідина	Відмінність летючості
Відгін	Рідина	Середовище відгону пари	Пара	Відмінність летючості
Екстрактна дистиляція	Рідина і/або пара	Рідкий розчинник і теплообмін	Рідина і пара	Відмінність летючості
Азеотропна дистиляція	Рідина і/або пара	Рідкий азеотропоутворювач і теплообмін	Рідина і пара	Відмінність летючості
Екстракція рідина-рідина	Рідина	Рідкий розчинник	Друга рідина	Відмінність розчинності
Кристалізація	Рідина	Теплообмін	Тверде	Відмінність розчинності чи температури плавлення
Адсорбція газу	Пара	Твердий адсорбент	Тверде	Відмінність адсорбуємості
Адсорбція рідини	Рідина	Твердий адсорбент	Тверде	Відмінність адсорбуємості
Мембранний	Рідина або пара	Мембрана	Мембрана	Відмінність проникності і/або розчинності
Зверхкритична екстракція	Рідина або пара	Зверхкритичний розчинник	Зверхкритичне середовище	Відмінність розчинності
Лудження	Тверде	Рідкий розчинник	Рідина	Відмінність розчинності
Сушіння	Тверде і рідина	Теплообмін	Пара	Відмінність летючості

Виділимо основні етапи методу:

Крок 1: Визначити суміш, що має бути розділена, і доступне устаткування.

Крок 2: Скласти порядковий список і всі можливі поділи, використовуючи розбиття списку.

Крок 3: Оцінити масове навантаження можливого поділу і вибрати поділ з мінімальними величинами коефіцієнта поділу α .

Крок 4: Виконати важкий поділ останнім.

Крок 5: Обрати оптимальну схему поділу.

Подібна процедура визначалася в [12] та ілюструвалася на прикладах, що включають суміші до 8 компонентів. Проте, вибір правила, яке повинно використовуватися у випадку конфлікту варіантів, не передбачався.

Евристичні правила або керівні принципи, засновані на досвіді, часто містять неоднозначні терміни, як, наприклад, "великий", "високий", "придатний" [13]. При такому суб'єктивному підході може виникнути плутанина, як розуміти ці терміни, або протиріччя при виборі евристик. Автоматизація цього вибору,

заснованого на теорії нечітких множин [15], представлена в пропонованій роботі. Як показує досвід авторів (див. роботи [16-18]), цю проблему можна вирішувати також із застосуванням пакету Fuzzy Logic Matlab.

Наприклад, може бути протиріччя між двома загальними цілями: "Виконайте поділ з мінімальною величиною передбачуваного коефіцієнта масового навантаження (крок 3)" і "Виконайте важкий поділ останнім (крок 4)", що означає "виконайте поділ з невеликим $\Delta T_{\text{кип}}$ останнім". Присутність такого протиріччя в нашій пропонованій евристичній процедурі дозволяє нам запропонувати більш прийнятне представлення цих евристичних правил засобами теорії нечітких множин, що забезпечує концептуальне представлення невизначеності.

Теорія нечітких множин була розроблена Л. Заде в 1965. Ця теорія може описати невизначеність, що має місце при рішенні багатьох задач у хімічній технології. Виходячи з [13], можна розрізняти два основних типи невизначеності: неоднозначність і неточність. Припущення, що є неоднозначним (воно або істинне, або хибне) не може бути точно встановлено. Припущення є неточним, якщо його величина не досить точна відповідно до даної шкали. Як неоднозначність, так і неточність, можуть також розділятися на багато типів невизначеностей [13]. Невизначеність наших евристичних правил належить до останнього типу, через нестачу точності умов подібно "високий" чи "невеликий".

Нечітка множина A у просторі $X = \{x\}$ може бути визначена як множина:

$$A = \{x, \mu_A(x)\}, \forall x \in X$$
$$\mu_A: X \rightarrow [0,1]$$
$$x \rightarrow \mu_A(x) \quad (1)$$

$\mu_A(x)$ виражає ступінь приналежності x множині A .

$\mu_A(x)=0$ означає, що x безперечно не належить множині A ;

$\mu_A(x)=1$ означає, що x безперечно належить множині A .

Застосування теорії нечітких множин в моделюванні хімічних виробництв, не є новою задачею. Зрозуміло, апарат нечітких множин може використовуватися для моделювання та прийняття рішень в умовах невизначеності параметрів процесу [18]. У роботі [13] зроблено огляд близько 30 робіт з використанням різних видів опису невизначеності в технічних задачах, головним чином для задач керування.

Кількісне представлення правил. Проілюструємо наш метод, заснований на нечіткому правилі, приймаючи до уваги наступні правила розділення:

Правило 1: "Якщо різниця температур кипіння $\Delta T_{\text{кип}}$ двох суміжних компонентів велика, тоді поділ буде між цими двома компонентами"

Правило 2: "Якщо величина коефіцієнта поділу α невелика, тоді виконуємо цей поділ"

Вони повторюють відповідно кроки 4 і 3 вищевказаної стратегії. Для застосування теорії нечітких множин ми повинні визначити систематично всі суб'єктивні і якісні умови ("великий" і "невеликий") двох правил.

Для правила 1, суб'єктивне розуміння терміна "великий" може переводитися різними шляхами у форму нечіткої множини. Ми вибрали простий шлях, заснований на понятті порога.

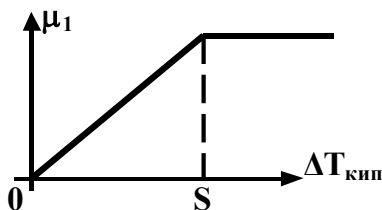


Рис. 1 – Кількісне представлення правила 1

Коли $\Delta T_{\text{кип}} = 0$, що означає, що ступінь приналежності правила 1, $\mu_1(\Delta T_{\text{кип}})$, дорівнює нулеві ($\Delta T_{\text{кип}}$ не "велика"). Навпаки, коли $\Delta T_{\text{кип}}$ більше величини порога S , тоді $\mu_1(\Delta T_{\text{кип}})=1$, що означає, що $\Delta T_{\text{кип}}$ певно "велика". Для простоти вважається, що ступінь приналежності буде лінійною функцією. Рис. 2 дає кількісне представлення. Інші типи кількісного представлення перевірені, з однієї сторони з двома порогамі S_1 і S_2

(ступінь приналежності дорівнює $\mu_1=0$, якщо $\Delta T_{\text{кип}} \leq S_1$ і $\mu_1=1$, якщо $\Delta T_{\text{кип}} \geq S_2$ і змінюється лінійно між S_1 і S_2), з іншої сторони без порога (лінійна зміна μ_1 ($\Delta T_{\text{кип}}$) між \min і \max величинами різниць температур кипіння для кожного можливого поділу). Результати, отримані для різних прикладів, не показують значимої зміни у випадку одно-граничного кількісного представлення, крім як в ускладненні обчислень.

Для правила 2 величина коефіцієнта поділу α має наступні обмеження:

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \quad (2)$$

Ми визначили термін "невеликий" для коефіцієнта поділу α відносно близькості цієї величини до цих границь. Потім, коли α дорівнює α_{\min} , це означає, що ступінь приналежності правила 2, μ_2 (α), дорівнює 1 (α "невелике"). Навпаки, коли α близько до α_{\max} , тоді μ_2 (α) близько до 0, що означає, що α не "невелике". Для простоти вважається, що ступінь приналежності буде лінійною. Рис. 2 дає кількісне представлення цієї залежності.

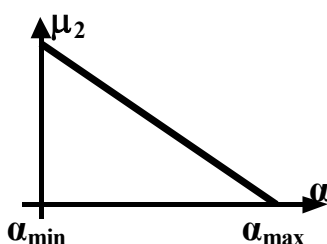


Рис. 2 – Кількісне представлення правила 2

Пропонована стратегія заснована на оцінці вірогідності кожного правила для кожного можливого поділу. Після кроку кількісного представлення для кожного поділу обчислюються величини μ_1 і μ_2 , і потім ми застосовуємо:

$$\mu_{\text{rule1 AND rule2}} = \min(\mu_{\text{rule1}}, \mu_{\text{rule2}}) = \min(\mu_1, \mu_2) \quad (3)$$

$$\mu^* = \max_i(\mu_{\text{split } i}) = \max_i(\min(\mu_1, \mu_2)_{\text{split } i}) \quad (4)$$

і ми вибираємо розділення, що відповідає μ^* .

Основні кроки стратегії представлені на рис. 3.

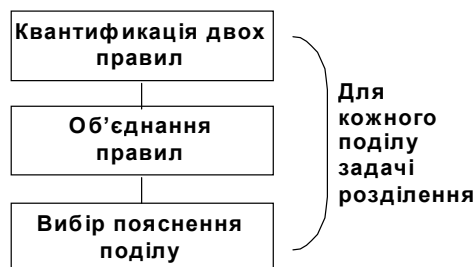


Рис. 3 – Основні кроки нечіткої стратегії

Вищезгадана стратегія на кроці кількісного представлення підпорядкована величині порога S . Ця точка (це може також відбутися й у не-нечіткому випадку) може використовуватися для визначення квазіоптимальних рішень задачі складання послідовності за правилами релаксації поділу. Зміни в стратегії поділу заснованої на попередньому відношенні (4) можуть відбутися тільки для невеликої області критичних значень порога S_c . Для n -компонентної суміші може бути визначене $(n-1)$ значення S_c , що визначає n інтервалів для величини S . Перекривання S із двома згаданими правилами в області всіх можливих значень відповідає вазі, закладеній у двох правилах.

Ця вагова процедура дозволяє нам сканувати область значень S від єдиного використання правила 1 до єдиного використання правила 2, як зазначено на рис. 4.

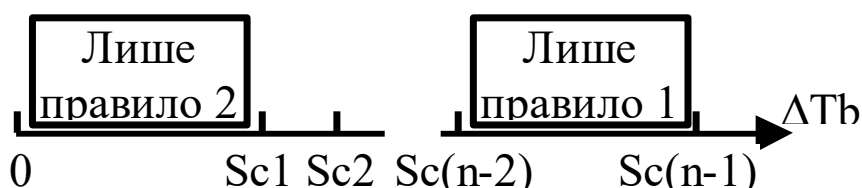


Рис. 4 – Критичний поріг Sc

Для даного нечіткого евристичного методу, заснованого на застосуванні двох евристичних правил для складання послідовностей розділення багатокомпонентних сумішей, було розроблено програмне забезпечення. Основна програма FSeparat має модульну структуру і складається з головної процедури, основного розрахункового модуля, модуля вводу даних і виводу результатів. Вигляд основних вікон програми для введення вхідних даних та виводу результатів розрахунків представлений на рис. 5 та 6.

Розглянемо приклад поділу 5-компонентної суміші ABCDE, визначеної в табл. 2 і при порозі S рівному 15 К для $\Delta T_{кип}$.

Таблиця 2 – П'ятикомпонентна суміш для поділу

Компонент	Мольна частка	Температура кипіння, К	$\Delta T_{кип}$, К
А: Пропилен	0,16	225,4	
В: Пропан	0,36	231,1	5,7
С: Ізобутан	0,21	261,3	30,2
Д: Н-бутан	0,16	272,7	11,4
Е: Н-пентан	0,11	309,2	36,5

The screenshot shows a software window titled 'Состав разделяемой смеси'. It features a dropdown menu for the number of components set to 5. Below is a table with columns for 'Компонент разделяемой смеси', 'Температура кипения, К', and 'Мольная доля, %'. The table lists five components: пропилен (225,4 K, 16%), пропан (231,1 K, 36%), изо-бутан (261,3 K, 21%), н-бутан (272,7 K, 16%), and н-пентан (309,2 K, 11%). The total is 100. A text field for 'Температурный порог разделения' is set to 15. At the bottom, there are radio buttons for 'Абсолютная' (selected) and 'Цельсия', and buttons for 'Расчет', 'Очистить', and 'Отмена'.

Рис. 5 – Вигляд вікна введення даних про склад суміші

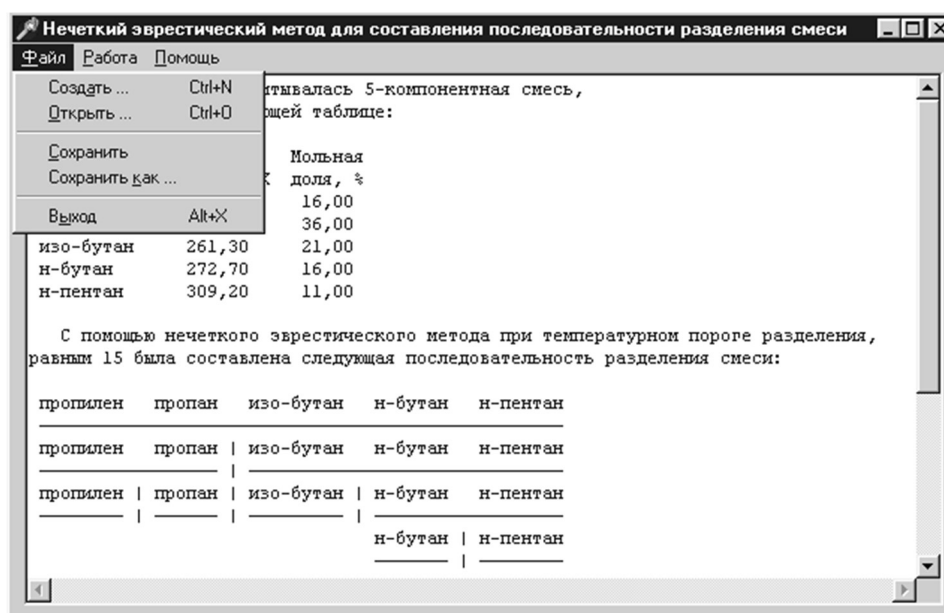


Рисунок 6 – Видяг основного вікна програми розрахунку

Витрата потоку 980 кмоль/годину.

1. Для кожного поділу обчислюємо $\Delta T_{кип}$ і α

$$\Delta T_{кип1}=231,1-225,4=5,7 \text{ К} \quad \alpha_{A/BCDE}=1,78$$

$$\Delta T_{кип2}=261,3-231,1=30,2 \text{ К} \quad \alpha_{AB/CDE}=1,32$$

$$\Delta T_{кип3}=272,7-261,3=11,4 \text{ К} \quad \alpha_{ABC/DE}=1,54$$

$$\Delta T_{кип4}=309,2-272,7=36,5 \text{ К} \quad \alpha_{ABCD/E}=2,01$$

2. Значення ступенів приналежності μ_1 і μ_2 оцінюються для кожного можливого поділу

$$\mu_1=0,38 \quad \mu_2=0,28 \quad \text{для A/BCDE}$$

$$\mu_1=1 \quad \mu_2=0,68 \quad \text{для AB/CDE}$$

$$\mu_1=0,76 \quad \mu_2=0,45 \quad \text{для ABC/DE}$$

$$\mu_1=1 \quad \mu_2=0,19 \quad \text{для ABCD/E}$$

3. Приймаємо

$$\mu^* = \max_i(\mu_{split i}) = \max_i(\min(\mu_1, \mu_2)_{split i})$$

$$\mu^* = \max(\min(0,38, 0,28), \min(1, 0,68), \min(0,76, 0,45), \min(1, 0,19))$$

$$\mu^* = 0,68, \text{ що відповідає поділу AB/CDE.}$$

4. Процедура повторюється із сумішню CDE.

$$\Delta T_{кип1}=11,4 \text{ К} \quad \alpha_{C/DE}=0,56$$

$$\Delta T_{кип2}=36,5 \text{ К} \quad \alpha_{CD/E}=0,77$$

$$\mu_1=0,76 \quad \mu_2=0,43 \quad \text{для C/DE}$$

$$\mu_1=1 \quad \mu_2=0,23 \quad \text{для CD/E}$$

$$\mu^* = \max(\min(0,76, 0,43), \min(1, 0,23))=0,43$$

У результаті чого вибираємо поділ C/DE. Остаточна послідовність [AB/CDE; C/DE; A/B; D/E] є оптимальної (табл. 4).

Основний інтерес у цьому підході представляє градація працюючих правил і можлива квантифікація набору правил, що виключає конфлікти між правилами. Наша процедура залежить від форми квантифікації прийнятого правила. Якщо ми прийmemo поріг S рівним 50 K для $\Delta T_{кип}$, тоді при поділі суміші CDE, поділ CD/E кращий, ніж C/DE, оскільки величини μ_i змінюються в $\mu_{1,C/DE} = 0,228$ і $\mu_{1,CD/E} = 0,73$. Величини критичного порога S_c для цього прикладу і зв'язаних послідовностей представлені на рис.7.



Рис. 7 – Критичний поріг S_c для тестового прикладу

Таблиця 4 – Можливі послідовності поділу для поділу 5-компонентної суміші

Послідовності поділу	Підсумкова вартість (10^5 \$/рік)
AB/CDE; C/DE; A/B; D/E	3,59
AB/CDE; CD/E; A/B; C/D	3,97
A/BCDE; B/CDE; C/DE; D/E	4,11
A/BCDE; B/CDE; CD/E; C/D	4,50
ABC/DE; AB/C; A/B; D/E	4,58
ABC/DE; A/BC; B/C; D/E	4,61
A/BCDE; BC/DE; B/C; D/E	4,81
ABCD/E; AB/CD; A/B; C/D	5,24
A/BCDE; BCD/E; B/CD; C/D	5,29
ABCD/E; A/BCD; B/CD; C/D	5,47
A/BCDE; BCD/E; BC/D; B/C	5,90
ABCD/E; ABC/D; AB/C; A/B	6,02
ABCD/E; ABC/D; A/BC; B/C	6,06
ABCD/E; A/BCD; BC/D; B/C	6,07

Рішення задачі синтезу послідовностей ректифікаційних колон за допомогою Fuzzy Logic Toolbox

Оскільки для рішення поставленої задачі використовується теорія нечітких множин, то для рішення задачі синтезу схем поділу 5, 6, 7, 8-ми компонентних сумішей вуглеводнів може бути використаний пакет Fuzzy Logic Toolbox програмного продукту Matlab.

Вихідними даними для визначення послідовності поділу суміші з n компонентів є: список компонентів, температури їх кипіння, мольні частки компонентів, граничне значення S для різниці температур кипіння (рис.8).

Для рішення задачі на мові Matlab була створена функція fseparat, що звертається до пакета Fuzzy Logic Toolbox, який у свою чергу і робить усі необхідні обчислення за методом Мамдані та візуалізує отримані результати (рис.9). Як можна бачити, результат пошуку оптимального вибору послідовності не відрізняється від знайденого раніше. Але для деяких процесів розділення представлено вище програмне забезпечення може давати гарантовано кращий результат ніж Fuzzy Logic Toolbox.

Висновки. Запропановано евристичну процедуру синтезу систем розділення багатокомпонентних сумішей хімічних виробництв засновану на правилах та нечіткій логіці. Обґрунтовано вибір правил та вимоги до вхідних даних задачі. Процедуру реалізовано в розробленій авторами програмній системі та показано можливості її роботи у пакеті Fuzzy Logic Toolbox середовища Matlab. Роботу запропонованої процедури протестовано в обох програмних реалізаціях на прикладі розділення 5-компонентної суміші.

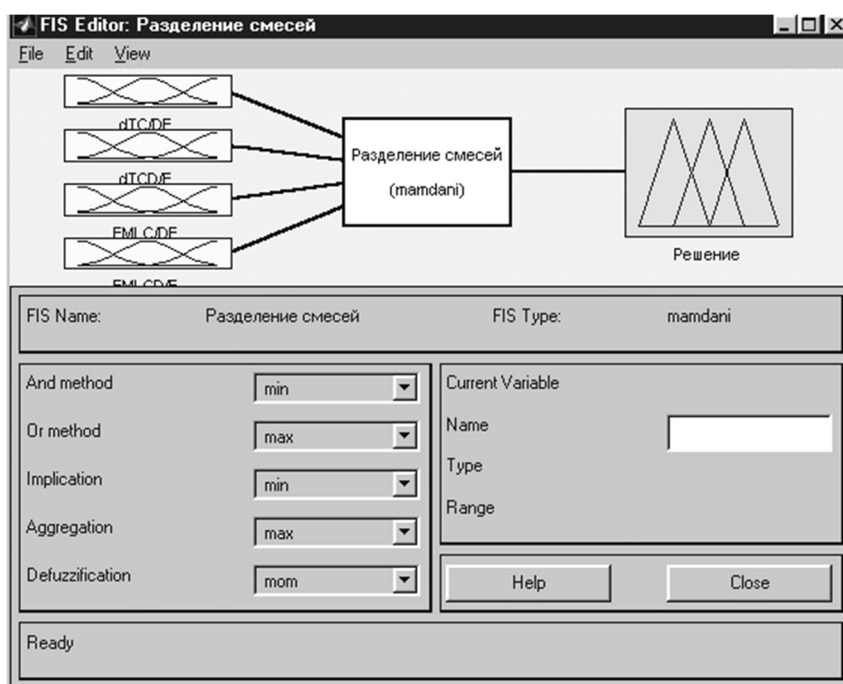


Рис. 8 – Основне вікно рішення задачі засобами Fuzzy Logic Toolbox у середовищі Matlab

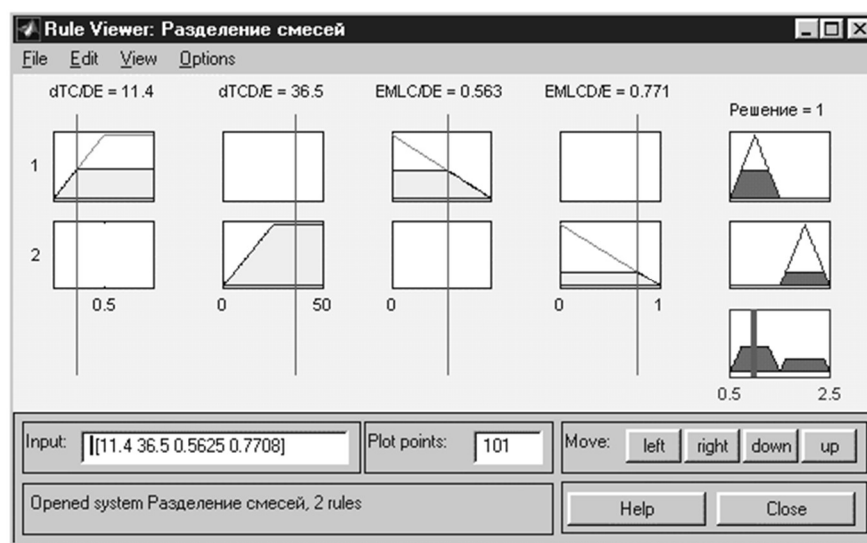


Рис. 9 – Отримані результати рішення на етапі дефазифікації

Перспективи подальших досліджень.

Складність систем поділу в першу чергу пояснюється інколи комбінаторною кількістю можливих варіантів, і тому доводиться приймати рішення за умови багатьох чинників розділення в умовах невизначеності. Крім того, важливим аспектом має бути не тільки вибір оптимального варіанту за економічними критеріями, але й з точки зору оптимального керування такими системами. Тому можна продовжувати дослідження та програмні розробки вже як задачу управління процесом розділення. Це може бути зроблено наприклад у тому ж середовищі Matlab, але вже із використанням пакету Simulink та Fuzzy Logic, які для цього підходять найбільше.

Список використаної літератури

1. Seader, J. D., Henley E. J., Separation Process Principles, Wi-ley, New York, 1998. 824 p.
2. Ernest J. Henley, J. D. Seader, D. Keith Roper, Separation Process Principles, 3rd Edition International Student Version ISBN: 978-0-470-64611-3, 2011 Wiley & Sons, Incorporated, John 936 p.
3. Warren D. Seider, J. D. Seader, Daniel R. Lewin. Process Design Principles: Synthesis, Analysis, and Evaluation. Wiley: New York. 1999. 824p.
4. Don W. Green, Marylee Z. Southard. Perry's Chemical Engineers' Handbook, 9th Edition (McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto, 2019). <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071834087> (дата звернення: 19.09.2021).
5. Комиссаров Ю. А., Гордеев Л. С., Вент Д. П. Химическая технология. Научные основы процессов ректификации. В 2 частях. Часть 2. Учебное пособие. Издательство: Юрайт, 2019. 416 с.
6. Платонов В. М., Берго Б. Г. Разделение многокомпонентных смесей. М.: Химия, 1965. 368 с.
7. Петлюк Ф. Б., Серафимов Л. А. Многокомпонентная ректификация. Теория и расчет. М.: Химия, 1983. 304 с.
8. Викторов В. К. Вертикальная декомпозиция при синтезе ректификационных систем. *Теор. основы хим. технол.* 2000. Т. 34. № 2. с. 170-177.
9. Fuzzy Logic Modeling and Observers Applied to Estimate Compositions in Batch Distillation Columns. Mario Heras-Cervantes, Gerardo Marx Chávez-Campos, Héctor Javier Vergara Hernández, Adriana del Carmen Téllez-Anguiano, Juan Anzures-Marin and Elisa Espinosa-Juárez 2019 DOI: 10.5772/intechopen.83479. <https://www.intechopen.com/chapters/65195> (дата звернення: 19.09.2021).
10. Adriana del Carmen Téllez-Anguiano, Mario Heras-Cervantes, Juan Anzures-Marin, Gerardo Marx Chávez-Campos and José Antonio Gutiérrez Gnechi. Mathematical Modelling of Batch Distillation Columns: A Comparative Analysis of Non-Linear and Fuzzy Models. https://webclass.certifiedtraininginstitute.com/engineering/Mathematical_Modelling_of_Batch_Distillation_Columns.pdf (дата звернення: 19.09.2021).
11. Lopez-Saucedo, E. S., Grossmann, I. E., Segovia-Hernandez, J. G., & Hernández, S. Rigorous modeling, simulation and optimization of a conventional and nonconventional batch reactive distillation column: A comparative study of dynamic optimization approaches. *Chemical Engineering Research and Design*. 2016. 111. P. 83–99. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876216300442>
12. Floquet P., Pibouleau L., Aly S., Domenech S. Fuzzy heuristic approach for sharp separation sequence synthesis. *Computers & Chemical Engineering*. 1994. V. 18. P. 785-795.
13. Kraslawski A. Review of application of various types of uncertainty in chemical engineering. *Chem. Eng. Process*. 1989. V. 26. P. 185–191. [https://doi.org/10.1016/0255-2701\(89\)80016-9](https://doi.org/10.1016/0255-2701(89)80016-9).
14. Hendry, J. E., Hughes R. R. Generating Separation Process Flowsheets. *Chem. Eng. Prog.*, 1972. N 6. P. 68-71.
15. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab. М. : Горячая линия-Телеком, 2007. 288 с.
16. Beznosyk Yu., Bugaieva L. An intelligent system for choosing a method of gas purification based on Fuzzy Logic. Збірник наукових статей Восьмої міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерне моделювання в хімії і та технологіях і системах сталого розвитку – КМХТ2020», Київ 19-22 травня 2020 року. Київ, 2020. С.382-388.
17. Бугаєва Л. М., Безносик Ю. О., Іванов М. В. Можливості нечіткої логіки для рішення технологічних задач на прикладі газотурбінного устаткування. Збірник наукових статей Сьомої міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерне моделювання в хімії і технологіях та системах сталого розвитку – КМХТ2019», Київ 6-8 травня 2019 року. Київ, 2019. С. 40-43.
18. Статюха Г. О., Безносик Ю. О., Бугаєва Л. М. Интеллектуальні системи прийняття рішень при дослідженні та проектуванні хіміко-технологічних процесів. У двох книгах. – Київ: Політехніка, 2004. – 416 с.

Liudmyla Bugaieva, Yurii Beznosyk

HEURISTIC PROCEDURE FOR SYNTHESIS OF SEPARATION SYSTEM FOR MULTICOMPONENT MIXTURES USING FUZZY LOGIC

In this study, the task is to develop a heuristic procedure for the synthesis of systems for the separation of multicomponent mixtures, which would take into account the uncertainty of the factors of the separation processes and the multivariance of the solution.

The authors reviewed the current state of the existing methods for the separation of mixtures. Many works devoted to the synthesis of effective systems for the separation of multicomponent mixtures leave unsolved the problem of taking into account the uncertainty of many factors of the separation processes. In the presented work, it is proposed that a heuristic approach is applied using fuzzy logic.

The proposed procedure is based on the choice of a separation sequence that takes into account the value of the separation coefficient and the difference in boiling points of two adjacent key components. The proposed strategy is based on an estimate of the likelihood of each rule for each possible separation. The search for solutions has five stages. First, the mixture to be separated and the available equipment are determined. After that, an ordered list of all separation options is drawn up with possible values of the economic costs of their implementation. Next, the mass load of possible separation is estimated and the separation with the minimum value of the separation ratio is selected. The heuristic is that the heavy separation is done last. And, at the last step, the most economical separation scheme is selected.

The above strategy at the stage of quantitative assessment is subject to the value of the threshold S (boiling point difference). This point can be used to determine the quasi-optimal solutions to the problem of sequencing according to the rules of relaxation of separation.

For this fuzzy heuristic method for determining cost-effective separation sequences for mixtures, appropriate software has been developed. In addition, since the procedure uses the theory of fuzzy sets, the Fuzzy Logic Toolbox package of the Matlab was also used to solve the problem of synthesizing schemes for separating hydrocarbon mixtures. The proposed procedure was successfully tested in both software implementations using the example of separating a five-component mixture.

The main difference between the proposed approach and other approaches based on fuzzy logic for the synthesis of separation systems is the gradation of working rules and possible quantification of a set of rules, which eliminates conflicts between the rules.

Keywords: *separation, mixture, fuzzy logic, heuristic, procedure*

References

1. Seader, J. D., and Henley E. J. (1998) Separation Process Principles, Wi-ley, New York. 824 p.
2. Ernest J. Henley, Seader J. D., and Keith D. Roper. (2011) Separation Process Principles, 3rd Edition International Student Version ISBN: 978-0-470-64611-3. Wiley & Sons, Incorporated, John 936 p.
3. Warren D. Seider, J. D. Seader, and Daniel R. Lewin. (1999) Process Design Principles: Synthesis, Analysis, and Evaluation. Wiley: New York. 824p.
4. Don W. Green, Marylee Z. Southard. (2019) Perry's Chemical Engineers' Handbook, 9th Edition (McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto.). <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071834087> (дата звернення: 19.09.2021).
5. Komissarov Ju. A., Gordeev L. S., and Vent D. P. (2019) Himicheskaja tehnologija. Nauchnye osnovy processov rektifikacii. V 2 chastjah. Chast' 2. Uchebnoe posobie. Izdatel'stvo: Jurajt. 416 s
6. Platonov V. M., and Bergo B. G. (1965) Razdelenie mnogokomponentnyh smesej. M.: Himija. 368 s.
7. Petljuk F. B., and Serafimov L. A. (1983) Mnogokomponentnaja rektifikacija. Teorija i raschet. M.: Himija. 304 s.
8. Viktorov V. K. (2000) Vertikal'naja dekompozicija pri sinteze rektifikacionnyh sistem. *Teor. osnovy him. tehnol.* T. 34. № 2. s. 170-177.
9. Fuzzy Logic Modeling and Observers Applied to Estimate Compositions in Batch Distillation Columns. (2019). Mario Heras-Cervantes, Gerardo Marx Chávez-Campos, Héctor Javier Vergara Hernández, Adriana

- del Carmen Téllez-Anguiano, Juan Anzures-Marín and Elisa Espinosa-Juárez. DOI: 10.5772/intechopen.83479. <https://www.intechopen.com/chapters/65195> (дата звернення: 19.09.2021).
10. Adriana del Carmen Téllez-Anguiano, Mario Heras-Cervantes, Juan Anzures-Marín, Gerardo Marx Chávez-Campos and José Antonio Gutiérrez Gnecci. Mathematical Modelling of Batch Distillation Columns: A Comparative Analysis of Non-Linear and Fuzzy Models. https://webclass.certifiedtraininginstitute.com/engineering/Mathematical_Modelling_of_Batch_Distillation_Columns.pdf (дата звернення: 19.09.2021).
 11. Lopez-Saucedo, E. S., Grossmann, I. E., Segovia-Hernandez, J. G., & Hernández, S. (2016) Rigorous modeling, simulation and optimization of a conventional and nonconventional batch reactive distillation column: A comparative study of dynamic optimization approaches. *Chemical Engineering Research and Design*. V. 111. P. 83–99. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876216300442>
 12. Floquet P., Pibouleau L., Aly S., and Domenech S. (1994) Fuzzy heuristic approach for sharp separation sequence synthesis. *Computers & Chemical Engineering*. V. 18. P. 785-795.
 13. Kraslawski A. (1989) Review of application of various types of uncertainty in chemical engineering. *Chem. Eng. Process*. V. 26. P. 185–191. [https://doi.org/10.1016/0255-2701\(89\)80016-9](https://doi.org/10.1016/0255-2701(89)80016-9).
 14. Hendry, J. E., and Hughes R. R. (1972) Generating Separation Process Flowsheets. *Chem. Eng. Prog.* N 6. P. 68-71.
 15. Shtovba S. D. (2007) Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami Matlab. M. : Gorjachaja linija-Telekom. 288 s.
 16. Beznosyk Yu., and Bugaieva L. (2020) An intelligent system for choosing a method of gas purification based on Fuzzy Logic. Zbirnyk naukovykh statei Vosmoj mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Kompiuterne modeliuвання v khimii i ta tekhnolohiiakh i systemakh staloho rozvytku – KMKhT2020», Kyiv 19-22 travnia 2020 roku. Kyiv. S.382-388.
 17. Bugaieva L., Beznosyk Yu., and Ivanov M. (2019) Mozhlyvosti nechitkoi lohiky dlia rishennia tekhnolohichnykh zadach na prykladi hazoturbinoho ustatkuvannia. Zbirnyk naukovykh statei Somoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Kompiuterne modeliuвання v khimii i tekhnolohiiakh ta systemakh staloho rozvytku – KMKhT2019», Kyiv 6-8 travnia 2019 roku. Kyiv. S. 40-43.
 18. Statjukha, G.O., Beznosyk, Y.O. and Bugaieva, L.M. (2004) Intelligent decision-making systems in the research and design of chemical technological processes. Kiev: Polytechnic. 416.