



Прийнято 14.04.2026. Прорецензовано 08.05.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 681.5

DOI: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-104-112

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ КОЛОНИ РЕКТИФІКАЦІЇ У ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ВТОРИННИХ ДЕСТИЛЯТІВ НАФТИ

Борин В. С. *

Кандидат технічних наук, доцент кафедри
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7404-4964>
e-mail: borynvs@ukr.net

Шавранський М. В.

Кандидат технічних наук, доцент кафедри
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6636-1069>
e-mail: mykhailo.shavranskyi@nung.edu.ua

Вабіщевіч А. М.

Студент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0009-0005-7698-5840>
e-mail: akit@nung.edu.ua

Анотація. У статті розглянуто питання моделювання динамічної поведінки колони ректифікації, що використовується в технології переробки вторинних дистилятів нафти. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності функціонування нафтопереробних установок, забезпечення стабільності якості продуктів та зниження енерговитрат у змінних умовах експлуатації. Проведено аналіз особливостей технологічного процесу ректифікації вторинних нафтових фракцій, зокрема впливу складу сировини, теплових режимів та гідродинамічних параметрів на динамічні характеристики об'єкта. Розроблено математичну модель колони ректифікації, яка враховує матеріальні та теплові баланси, нелінійність процесів масо- та теплообміну, а також взаємозв'язки між основними технологічними змінними. Для опису динаміки використано систему диференціальних рівнянь, що дозволяє відтворювати перехідні процеси при зміні вхідних параметрів, таких як витрата сировини, температура та тиск. Здійснено ідентифікацію параметрів моделі на основі експериментальних або апроксимованих промислових даних. Проведено дослідження динамічних властивостей колони ректифікації, включаючи аналіз перехідних характеристик, стійкості та чутливості до збурень. Отримані результати дозволяють оцінити вплив керуючих дій на якість розділення компонентів та

Запропоноване посилання: Борин, В. С., Шавранський, М. В. & Вабіщевіч, А. М. (2026). Моделювання динамічної поведінки колони ректифікації у технології переробки вторинних дистилятів нафти. *Методи та прилади контролю якості*, 1(56), 104-112. doi: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-104-112

* Відповідальний автор



визначити оптимальні режими роботи установки. Запропонована модель може бути використана для подальшого синтезу систем автоматичного керування та оптимізації технологічного процесу. Практичне значення роботи полягає у можливості застосування розробленої моделі для підвищення ефективності керування ректифікаційними колонами, зниження енерговитрат і покращення показників якості кінцевої продукції на нафтопереробних підприємствах.

Ключові слова: ректифікаційна колона, динамічне моделювання, вторинні дистиляти нафти, математична модель, перехідні процеси, автоматичне керування, ідентифікація параметрів.

Вступ

Сучасний розвиток нафтопереробної галузі характеризується підвищеними вимогами до ефективності технологічних процесів, якості кінцевої продукції та раціонального використання енергетичних ресурсів. Особливої актуальності набувають процеси переробки вторинних дистилятів нафти, які є складними багатокомпонентними сумішами та потребують високоточного розділення. Одним із ключових апаратів у цих процесах є ректифікаційна колона, ефективність роботи якої значною мірою визначає загальні техніко-економічні показники виробництва.

Ректифікаційні колони характеризуються складною динамічною поведінкою, зумовленою нелінійністю процесів тепло- і масообміну, наявністю зворотних зв'язків між параметрами, а також впливом зовнішніх і внутрішніх збурень. Зміни складу сировини, коливання температурних режимів, тиску та витрат потоків призводять до виникнення перехідних процесів, що можуть негативно впливати на стабільність роботи установки та якість продуктів. У зв'язку з цим виникає необхідність глибокого дослідження динамічних властивостей ректифікаційних колон і розробки адекватних математичних моделей, здатних описувати їх поведінку в реальних умовах експлуатації.

На сьогодні існує значна кількість підходів до моделювання процесів ректифікації, однак багато з них орієнтовані на стаціонарні режими або спрощені припущення, що обмежує їх застосування для задач аналізу та синтезу систем автоматичного керування. Тому актуальним є створення динамічних моделей, які враховують особливості переробки вторинних нафтових дистилятів, зокрема змінність їх складу та специфіку технологічних режимів.

Для досягнення поставленої мети передбачено аналіз технологічного процесу, формування системи рівнянь, що описують динаміку об'єкта, проведення чисельного моделювання та оцінка основних динамічних характеристик. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності керування технологічними процесами та оптимізації режимів роботи ректифікаційних установок.

Постановка завдання

Розробити математичну модель колони ректифікації, яка відтворює її динамічні властивості в процесі переробки вторинних нафтових дистилятів, а також проведення аналізу отриманої моделі з метою оцінки її придатності для подальшого використання в задачах автоматичного керування.

Мета роботи

Метою цієї роботи є розробка та дослідження математичної моделі динамічної поведінки колони ректифікації в процесі переробки вторинних дистилятів нафти.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження виступає ректифікаційна колона.

Результати

Питання моделювання та дослідження динамічної поведінки ректифікаційних колон широко висвітлені у науковій літературі та охоплюють як класичні фундаментальні підходи, так і сучасні методи, орієнтовані на задачі оптимізації та автоматичного керування.

Однією з базових праць у галузі динаміки ректифікаційних процесів є огляд Sigurd Skogestad, де систематизовано основні підходи до аналізу динаміки та керу-

вання колон ректифікації. У роботі [1] автор підкреслює складність динамічної поведінки колон, наявність множинності стаціонарних станів та суттєвий вплив гідродинаміки потоків на якість керування. Також показано важливість коректного вибору структури керування та ідентифікації моделей для адекватного опису об'єкта.

Значний внесок у розвиток методів математичного моделювання зробили дослідники Rafiqul Gani, Iain Cameron та ін., які запропонували узагальнені моделі ректифікаційних колон на основі систем диференціальних рівнянь матеріальних і теплових балансів. Ці моделі стали основою для подальших досліджень динамічних режимів, зокрема процесів пуску та зупинки установок [2].

У роботах Vu Trieu Minh та Ahmad Majdi Abdul Rani розглянуто підходи до моделювання та керування ректифікаційними колонами у нафтопереробних процесах. Автори пропонують використання нелінійних моделей з подальшою лінеаризацією та побудовою зменшених моделей для задач адаптивного керування, що дозволяє враховувати вплив збурень та невідзначеностей [3].

Сучасні дослідження спрямовані на підвищення точності та обчислювальної ефективності моделей. Зокрема, у роботі Haiyan Tan та Lin Song запропоновано нелінійну динамічну модель, засновану на рівновазі «пара-рідина», яка дозволяє адекватно описувати масообмінні процеси при зменшенні складності обчислень [4]. Отримані результати демонструють переваги моделей, орієнтованих на використання в системах керування в реальному часі.

Подальший розвиток отримали підходи до моделювання нестационарних режимів роботи. У дослідженні Christian Hoffmann та співавторів запропоновано динамічну модель, яка враховує зміну фазових станів, гідродинамічні ефекти та особливості перехідних режимів (пуск, зупинка, зміна навантаження). Це дозволяє більш точно відтворювати реальні умови експлуатації колон [5].

У монографії під редакцією Vilmar Steffen узагальнено сучасні підходи до моделювання, симуляції та оптимізації процесів ректифікації, включаючи питання фазової рівноваги, енергетичної інтеграції та інтелектуальних методів керування [6]. Значна увага приділяється застосуванню гібридних і чисельних методів для складних багатокомпонентних систем.

Таким чином, аналіз літературних джерел показує, що, незважаючи на значний прогрес у галузі моделювання ректифікаційних колон, існує потреба у розробці адекватних динамічних моделей, які б враховували специфіку переробки вторинних нафтових дистилатів, нелінійність процесів та змінність технологічних режимів. Це обумовлює доцільність подальших досліджень у напрямі створення ефективних моделей для задач аналізу та синтезу систем автоматичного керування.

Динаміку нижньої частини ректифікаційної колони доцільно описати рівнянням теплового балансу, яке враховує надходження, відведення та акумулювання теплової енергії в апараті:

$$Q_D - Q_{P1} + Q_{P2} - \Delta Q_{KS} - Q_{ZS} - Q_{PP} = V_P C_P \rho_P \frac{dt_{P1}}{dt} \quad (1)$$

Ліва частина рівняння відображає сумарний тепловий потік: підведене тепло з сировиною Q_D , тепло, що відводиться з продуктом Q_{P1} , тепло, яке повертається з внутрішніх потоків Q_{P2} , а також втрати тепла (ΔQ_{KS} , Q_{ZS} , Q_{PP}). Права частина характеризує швидкість зміни теплового запасу в нижній частині колони, де V_P — об'єм рідини (9 м^3), C_P — питома теплоємність ($2,9 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$), ρ_P — густина, а dt_{P1}/dt — темп зміни температури.

Після деталізації складових отримаємо розгорнуте рівняння:

$$F_D C_D t_D - F_P C_P t_{P1} + F_P C_P t_{P2} - F_{1S1} (t_{P1} - t_\Phi) - 0.2 F_P C_P t_{P2} - (F_D C_D t_D + F_P C_P t_{P2}) q_1 = V_P C_P \rho_P \frac{dt_{P1}}{dt} \quad (2)$$

Тут F — масові витрати потоків, t — температури відповідних потоків, а доданок $F_{1S1}(t_{P1} - t_\Phi)$ описує теплообмін між нижньою та верхньою частинами колони.

Аналогічно, для верхньої частини (флегмової зони) записується рівняння:

$$Q_{\Phi} - Q_{B1} + \Delta Q_{KS} = V_{\Phi} c_{\Phi} \rho_{\Phi} \frac{dt_{\Phi}}{d\tau}, \quad (3)$$

де V_{Φ} – об'єм флегми в колоні (5 м^3);

c_{Φ} – теплоємність флегми в колоні ($3.260 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$);

$\rho_{\Phi} = 634 \text{ кг}/\text{м}^3$ – густина флегми в колоні

Це рівняння відображає баланс тепла для флегми: підведення тепла, відведення з верхнім продуктом та накопичення в об'ємі. Після розкриття складових:

$$F_{\Phi} c_{\Phi} t_{\Phi} - F_{B1} c_{B1} t_{B1} + F_1 s_1 (t_{P1} - t_{\Phi}) = V_{\Phi} c_{\Phi} \rho_{\Phi} \frac{dt_{\Phi}}{d\tau}. \quad (4)$$

Далі виконано лінеаризацію отриманих рівнянь, яка полягає у переході до малих відхилень від стаціонарного режиму (позначаються Δ).

$$\begin{aligned} & \Delta F_D c_D t_D + F_D c_D \Delta t_D - \Delta F_P c_P t_{P1} - \\ & - F_P c_P \Delta t_{P1} + \Delta F_P c_P t_{P2} + F_P c_P \Delta t_{P2} - \\ & - F_1 s_1 (\Delta t_{P1} - \Delta t_{\Phi}) - 0,2 \Delta F_P c_P t_{P2} - \\ & - 0,2 F_P c_P \Delta t_{P2} - (\Delta F_D c_D t_D + \Delta F_P c_P t_{P2}) q_1 - \\ & - (F_D c_D \Delta t_D + F_P c_P \Delta t_{P2}) q_1 = \\ & = V_P c_P \rho_P \frac{d\Delta t_{P1}}{d\tau}. \end{aligned}$$

Це дозволяє спростити нелінійну модель та зробити її придатною для аналізу систем керування.

Після цього застосовано перетворення Лапласа, що переводить диференціальні рівняння у алгебраїчні в операторній формі (змінна p).

$$\begin{aligned} & F_D(p) c_D t_D + F_D c_D t_D(p) - F_P(p) c_P t_{P1} - \\ & - F_P c_P t_{P1}(p) + F_P(p) c_P t_{P2} + F_P c_P t_{P2}(p) - \\ & - F_1 s_1 (t_{P1}(p) - t_{\Phi}(p)) - 0,2 F_P(p) c_P t_{P2} - \\ & - 0,2 F_P c_P t_{P2}(p) - (F_D(p) c_D t_D + F_P(p) c_P t_{P2}) q_1 - \\ & - (F_D c_D t_D(p) + F_P c_P t_{P2}(p)) q_1 = \\ & = V_P c_P \rho_P p t_{P1}(p). \end{aligned} \quad (5)$$

Це значно спрощує подальший аналіз і дозволяє отримати передавальні функції.

Аналогічно проведено лінеаризацію для верхньої частини ректифікаційної колони:

$$\begin{aligned} & \Delta F_{\Phi} c_{\Phi} t_{\Phi} + F_{\Phi} c_{\Phi} \Delta t_{\Phi} - \Delta F_{B1} c_{B1} t_{B1} - \\ & - F_{B1} c_{B1} \Delta t_{B1} + F_1 s_1 (\Delta t_{P1} - \Delta t_{\Phi}) = \\ & = V_{\Phi} c_{\Phi} \rho_{\Phi} \frac{d\Delta t_{\Phi}}{d\tau}. \end{aligned}$$

Відповідно, виконано перетворення Лапласа:

$$\begin{aligned} & F_{\Phi}(p) c_{\Phi} t_{\Phi} + F_{\Phi} c_{\Phi} t_{\Phi}(p) - F_{B1}(p) c_{B1} t_{B1} - \\ & - F_{B1} c_{B1} t_{B1}(p) + F_1 s_1 (t_{P1}(p) - t_{\Phi}(p)) = \\ & = V_{\Phi} c_{\Phi} \rho_{\Phi} p t_{\Phi}. \end{aligned} \quad (6)$$

Із рівняння (6), яке описує динамічний тепловий баланс у верхній частині ректифікаційної колони, визначаємо операторне зображення температури флегми t_{Φ} . Отриманий вираз дозволяє представити температуру флегми як функцію вхідних потоків, їх температур та параметрів теплообміну в колоні.

Подальшим кроком є підстановка знайденого виразу t_{Φ} у рівняння (5), що описує динаміку нижньої частини колони. Така підстановка дає змогу виключити проміжну змінну (температуру флегми) та отримати узагальнене рівняння, яке безпосередньо встановлює зв'язок між вхідними впливами (зокрема витратами потоків) і температурою в нижній частині колони $t_{P1}(p)$.

$$\begin{aligned} & t_{\Phi}(p) = \{F_{\Phi}(p) c_{\Phi} t_{\Phi} - F_{B1}(p) c_{B1} t_{B1} - \\ & - F_{B1} c_{B1} t_{B1}(p) + F_1 s_1 t_{P1}(p)\} \times \\ & \times \{V_{\Phi} c_{\Phi} \rho_{\Phi} p - F_{\Phi} c_{\Phi} + F_1 s_1\}^{-1}; \\ & F_D(p) c_D t_D + F_D c_D t_D(p) - F_P(p) c_P t_{P1} - \\ & - F_P c_P t_{P1}(p) + F_P(p) c_P t_{P2} + F_P c_P t_{P2}(p) - \\ & - F_1 s_1 (t_{P1}(p) - \{F_{\Phi}(p) c_{\Phi} t_{\Phi} - \\ & - F_{B1}(p) c_{B1} t_{B1} - F_{B1} c_{B1} t_{B1}(p) + F_1 s_1 t_{P1}(p)\}) \times \\ & \times \{V_{\Phi} c_{\Phi} \rho_{\Phi} p - F_{\Phi} c_{\Phi} + F_1 s_1\}^{-1} - \\ & - 0,2 F_P(p) c_P t_{P2} - 0,2 F_P c_P t_{P2}(p) - \\ & - (F_D(p) c_D t_D + F_P(p) c_P t_{P2}) q_1 - \\ & - (F_D c_D t_D(p) + F_P c_P t_{P2}(p)) q_1 = \\ & = V_P c_P \rho_P p t_{P1}(p). \end{aligned} \quad (7)$$

Розглянемо канал керування $F_{\Phi} \rightarrow t_{P1}$, тобто вплив витрати флегми на температуру в нижній частині ректифікаційної колони. Такий вибір каналу дозволяє дослідити ефективність регулювання температурного режиму через зміну інтенсивності зрошення колони.

$$\begin{aligned} & V_P c_P \rho_P p t_{P1}(p) + F_P c_P t_{P1}(p) + F_1 s_1 t_{P1}(p) = \\ & = F_1 s_1 \frac{F_{\Phi}(p) c_{\Phi} t_{\Phi} + F_1 s_1 t_{P1}(p)}{V_{\Phi} c_{\Phi} \rho_{\Phi} p - F_{\Phi} c_{\Phi} + F_1 s_1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Після підстановки виразу для температури флегми та спрощення загального рівняння (8) отримаємо:

$$\frac{V_P C_P \rho_P V_\Phi C_\Phi \rho_\Phi}{(F_P C_P + F_1 S_1)(F_1 S_1 - F_\Phi C_\Phi) - F_1^2 S_1^2} p^2 t_{P1}(p) + \frac{V_P C_P \rho_P (F_1 S_1 - F_\Phi C_\Phi) + (F_P C_P t_{P1} + F_1 S_1) V_\Phi C_\Phi \rho_\Phi}{(F_P C_P + F_1 S_1)(F_1 S_1 - F_\Phi C_\Phi) - F_1^2 S_1^2} * p t_{P1}(p) + t_{P1}(p) = \frac{F_1 S_1 C_\Phi t_\Phi}{(F_P C_P + F_1 S_1)(F_1 S_1 - F_\Phi C_\Phi) - F_1^2 S_1^2} * F_\Phi(p),$$

де

$$A_2 = \frac{V_P C_P \rho_P V_\Phi C_\Phi \rho_\Phi}{(F_P C_P + F_1 S_1)(F_1 S_1 - F_\Phi C_\Phi) - F_1^2 S_1^2} = 24.2;$$

$$A_1 = \{V_P C_P \rho_P (F_1 S_1 - F_\Phi C_\Phi) + (F_P C_P t_{P1} + F_1 S_1) V_\Phi C_\Phi \rho_\Phi\} \times \{(F_P C_P + F_1 S_1)(F_1 S_1 - F_\Phi C_\Phi) - F_1^2 S_1^2\}^{-1} = 21.3.$$

Розглядаючи канал керування $F_\Phi \rightarrow t_{P1}$, тобто вплив витрати флегми на температуру в нижній частині колони, рівняння зводиться до стандартної (канонічної) форми другого порядку:

$$A_2 p^2 t_{P1}(p) + A_1 p t_{P1}(p) + t_{P1}(p) = k_1 F_\Phi(p).$$

Коефіцієнти A_2 , A_1 характеризують інерційні та акумулюючі властивості системи, а k_1 — коефіцієнт підсилення, що визначає чутливість температури до зміни витрати флегми.

Передавальна функція має вигляд:

$$W_{F_\Phi \rightarrow t_{P1}}(p) = \frac{t_{P1}(p)}{F_\Phi(p)}; \\ W_{F_\Phi \rightarrow t_{P1}}(p) = \frac{k_1}{A_2 p^2 + A_1 p + 1} = \frac{0.634}{24.27 p^2 + 21.33 p + 1} \quad (9)$$

У результаті формується єдина замкнена математична модель, що враховує взаємозв'язок між верхньою та нижньою зонами ректифікаційної колони та дозволяє перейти до подальшого аналізу системи, зокрема визначення передавальних функцій і дослідження динамічних характеристик.

Отримана передавальна функція описує динамічні властивості об'єкта як аперіодичну систему другого порядку та може бути використана для аналізу перехідних процесів і синтезу систем автоматичного керування. Перехідна характеристика, побудована в середовищі MATLAB, відображає реакцію температури на зміну витрати флегми та підтверджує інерційний характер процесу.

Розглянемо канал керування $F_{B1} \rightarrow t_{P1}$, тобто вплив витрати верхнього продукту (дистиляту) на температуру в нижній частині ректифікаційної колони. Аналіз цього каналу дозволяє оцінити, як зміна відбору продукту з верхньої частини впливає на тепловий режим кубової зони.

Після підстановки відповідних складових у загальне рівняння (7) та його спрощення отримуємо:

$$V_P C_P \rho_P p t_{P1}(p) + F_P C_P t_{P1}(p) + F_1 S_1 t_{P1}(p) = \frac{-F_{B1}(p) C_{B1} t_{B1} + F_1 S_1 t_{P1}(p)}{V_\Phi C_\Phi \rho_\Phi p - F_\Phi C_\Phi + F_1 S_1} \quad (10)$$

У цьому рівнянні ліва частина, як і раніше, описує теплову інерцію та внутрішні теплові процеси нижньої частини колони:

- член $V_P C_P \rho_P p t_{P1}(p)$ відповідає за акумулювання теплової енергії;
- $F_P C_P t_{P1}(p)$ — за винесення тепла з потоком;
- $F_1 S_1 t_{P1}(p)$ — за теплообмін між зонами колони.

Права частина відображає вплив верхнього продукту: від'ємний доданок $-F_{B1}(p) C_{B1} t_{B1}$ показує, що збільшення відбору дистиляту призводить до зменшення теплового вмісту системи, тобто має охолоджувальний ефект.

Зводимо рівняння (10) до канонічної форми:

$$\frac{V_P C_P \rho_P V_\Phi C_\Phi \rho_\Phi}{(F_P C_P + F_1 S_1)(F_1 S_1 - F_\Phi C_\Phi) - F_1^2 S_1^2} p^2 t_{P1}(p) + \frac{V_P C_P \rho_P (F_1 S_1 - F_\Phi C_\Phi) + (F_P C_P t_{P1} + F_1 S_1) V_\Phi C_\Phi \rho_\Phi}{(F_P C_P + F_1 S_1)(F_1 S_1 - F_\Phi C_\Phi) - F_1^2 S_1^2} * p t_{P1}(p) + t_{P1}(p) = \frac{F_1 S_1 C_{B1} t_{B1}}{(F_P C_P + F_1 S_1)(F_1 S_1 - F_\Phi C_\Phi) - F_1^2 S_1^2} * F_{B1}(p),$$

де

$$k_2 = \frac{-F_1 S_1 t_{B1} C_{B1}}{(F_P C_P + F_1 S_1)(F_1 S_1 - F_\Phi C_\Phi) - F_1^2 S_1^2} = -0.695.$$

Від'ємне значення k_2 має важливий фізичний зміст: воно свідчить про те, що збільшення витрати верхнього продукту F_{B1} призводить до зниження температури t_{P1} у нижній частині колони. Це пояснюється інтенсивнішим відведенням тепла з системи.

Після приведення рівняння (10) до канонічної форми отримуємо стандартне рівняння динамічної системи другого порядку:

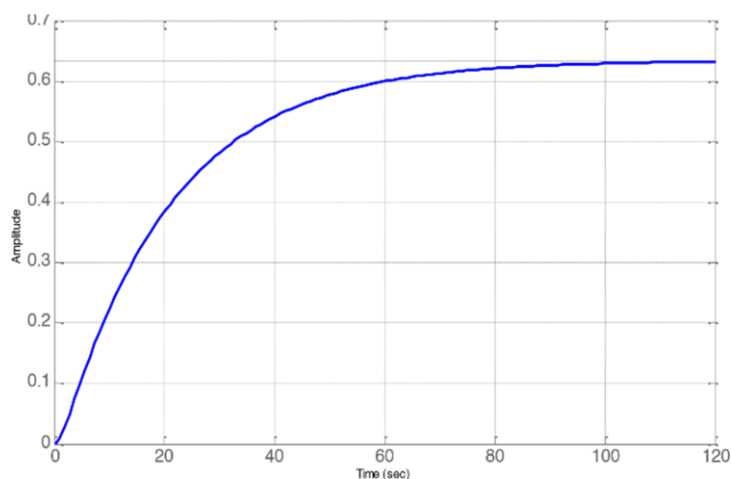
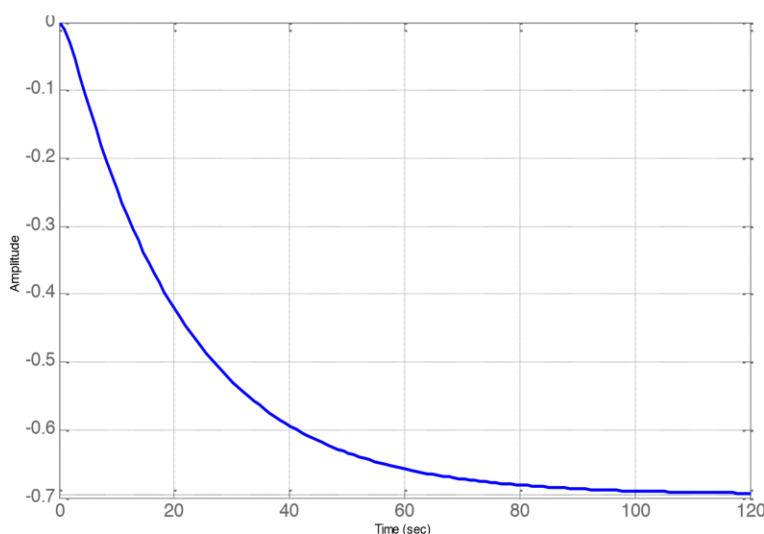


Рисунок 1 – Перехідна характеристика, побудова в середовищі MATLAB

Рисунок 2 – Перехідна характеристика, побудована в середовищі MATLAB по каналу $t_{E1} \rightarrow t_{P1}$

$$A_2 p^2 t_{P1}(p) + A_1 p t_{P1}(p) + t_{P1}(p) = k_2 F_{B1}(p),$$

де коефіцієнти A_2 та A_1 залишаються такими ж, як і для попереднього каналу керування, оскільки вони визначаються фізичними параметрами системи (об'ємами, теплоємностями та умовами теплообміну).

Передавальна функція для каналу керування має вигляд:

$$W_{F_{B1} \rightarrow t_{P1}}(p) = \frac{k_2}{A_2 p^2 + A_1 p + 1} = \frac{-0.695}{24.27 p^2 + 21.33 p + 1}. \quad (11)$$

Отримана передавальна функція описує динаміку об'єкта як аперіодичну ланку другого порядку з від'ємним підсиленням. Це означає, що система є інерційною та реагує на зміну керуючого впливу із затримкою, а напрям зміни вихідної величини

протилежний до напрямку зміни вхідного сигналу.

Перехідна характеристика, побудована в середовищі MATLAB (рис. 2), наочно демонструє цей ефект: при збільшенні витрати верхнього продукту температура в нижній частині колони зменшується, причому процес має згладжений аперіодичний характер без коливань.

Розглянемо канал керування $t_{B1} \rightarrow t_{P1}$, тобто вплив температури верхнього продукту (дистиляту) на температуру в нижній частині ректифікаційної колони. Дослідження цього каналу дозволяє оцінити тепловий взаємозв'язок між верхньою та нижньою зонами колони та визначити, як зміна температури відбору впливає на тепловий стан кубової частини.

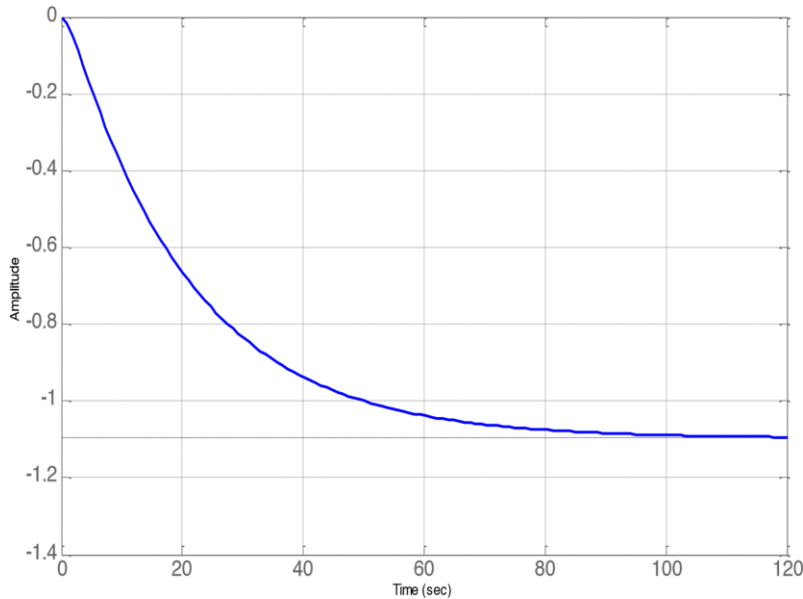


Рисунок 3 – Перехідна характеристика, побудована в середовищі MATLAB по каналу $t_{E1} \rightarrow t_{P1}$

Після відповідних перетворень загального рівняння (7) та його спрощення отримуємо:

$$V_P C_P \rho_P p t_{P1}(p) + F_P C_P t_{P1}(p) + F_1 S_1 t_{P1}(p) = \frac{-F_{B1} t_{B1} C_{B1}(p) + F_1 S_1 t_{P1}(p)}{V_{\Phi} C_{\Phi} \rho_{\Phi} p - F_{\Phi} C_{\Phi} + F_1 S_1}. \quad (12)$$

Ліва частина рівняння, як і в попередніх випадках, описує інерційні властивості нижньої частини колони:

- доданок $V_P C_P \rho_P p t_{P1}(p)$ характеризує накопичення теплової енергії;
- $F_P C_P t_{P1}(p)$ — винесення тепла з потоком;
- $F_1 S_1 t_{P1}(p)$ — теплообмін між нижньою та верхньою частинами.

Права частина враховує вплив температури верхнього продукту. Доданок $-F_{B1} C_{B1} t_{B1}(p)$ показує, що зі збільшенням температури дистилляту зростає інтенсивність відведення тепла з системи, що, у свою чергу, знижує температуру в нижній частині колони.

Після приведення рівняння (12) до канонічного вигляду отримуємо:

$$A_2 p^2 t_{P1}(p) + A_1 p t_{P1}(p) + t_{P1}(p) = k_3 t_{B1}(p),$$

де коефіцієнти A_2 та A_1 є аналогічними до попередніх випадків і визначають інерційні та дисипативні властивості системи.

Передавальна функція каналу має вигляд:

$$W_{t_{B1} \rightarrow t_{P1}}(p) = \frac{k_3}{A_2 p^2 + A_1 p + 1} = \frac{-1.097}{24.27 p^2 + 21.33 p + 1}.$$

Отримана передавальна функція описує динаміку системи як аперіодичну ланку другого порядку з від’ємним коефіцієнтом підсилення. Це означає, що система реагує на зміну температури верхнього продукту із запізненням і без коливань, а напрям зміни вихідної величини є протилежним до вхідного впливу.

Перехідна характеристика, побудована в середовищі MATLAB (рис. 3), підтверджує ці властивості: зміна температури дистилляту викликає згладжену інерційну реакцію температури в нижній частині колони з протилежним знаком відгуку.

Висновки

У ході дослідження було проведено комплексне моделювання динамічної поведінки ректифікаційної колони, що застосовується в технології переробки вторинних дистиллятів нафти. Розроблена математична модель враховує матеріальні та теплові баланси, нелінійність процесів масо- і теплообміну, а також взаємозв’язки між основними технологічними параметрами. Це дозволяє відтворювати перехідні процеси, що виникають при зміні витрати сировини, температури, тиску та інших вхід-

них умов, а також оцінювати вплив збурень на стабільність роботи колони.

Проведене чисельне моделювання продемонструвало високу адекватність запропонованої моделі: перехідні характеристики та час виходу на новий стаціонарний режим відповідають промисловим спостереженням і даним літератури. Аналіз динамічних властивостей колони показав, що чутливість системи до змін витрати та складу сировини є значною, що підкреслює важливість застосування ефективних методів автоматичного керування для забезпечення стабільності технологічного процесу. Водночас модель дозволяє прогнозувати оптимальні режими роботи колони з урахуванням енергетичних витрат та якості кінцевої продукції, що є важливим фактором підвищення ефективності нафтопереробних установок.

Запропонований підхід до моделювання відкриває можливості для подальшого розвитку систем керування. Зокрема, модель може бути використана для синтезу адаптивних або оптимізованих регуляторів, які враховують змінність складу вторинних дистилятів та реакцію колони на зовнішні збурення. Це дозволяє підвищити енергоефективність, зменшити втрати про-

дуктів і підвищити безпеку експлуатації обладнання.

Практична значимість роботи полягає у тому, що розроблена модель є універсальним інструментом для інженерного аналізу та оптимізації процесів ректифікації. Вона забезпечує можливість оцінки перехідних режимів роботи, прогнозування результатів змін технологічних параметрів та підготовки рекомендацій для підвищення стабільності та ефективності виробництва.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність застосування динамічного моделювання для вивчення процесів ректифікації вторинних нафтових дистилятів, що відкриває перспективи для подальшого вдосконалення технологій переробки, автоматизації керування та зниження енергетичних витрат. Вони можуть бути використані як у наукових дослідженнях, так і у практичній діяльності нафтопереробних підприємств.

Подяки

Відсутні

Конфлікти інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Skogestad S. Dynamics and control of distillation columns. *Modeling, Identification and Control (MIC)*. 1997. Vol. 18, No. 3. P. 177–217. URL: <https://doi.org/10.4173/mic.1997.3.1>
2. Hoffmann C., Weigert J., Esche E., Repke J.-U. A pressure-driven, dynamic model for distillation columns with smooth reformulations for flexible operation. *Computers & Chemical Engineering*. 2020. Vol. 142. Art. 107062. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107062>
3. Minh V. T., Rani A. M. A. Modeling and control of distillation column in a petroleum process. *Mathematical Problems in Engineering*. 2009. Vol. 2009. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1155/2009/404702>
4. Tan H., Cong L. Modeling and control design for distillation columns based on the equilibrium theory. *Processes*. 2023. Vol. 11, No. 2. Art. 607. URL: <https://doi.org/10.3390/pr11020607>
5. Steffen V. Distillation – modelling, simulation and optimization. Introductory chapter: Distillation. *IntechOpen*. 2019. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.88404>

References

1. Skogestad, S. (1997). Dynamics and control of distillation columns. *Modeling, Identification and Control (MIC)*, 18(3), 177–217. <https://doi.org/10.4173/mic.1997.3.1>
2. Hoffmann, C., Weigert, J., Esche, E., & Repke, J.-U. (2020). A pressure-driven, dynamic model for distillation columns with smooth reformulations for flexible operation. *Computers &*

Chemical Engineering, 142, Article 107062.
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107062>

3. Minh, V. T., & Rani, A. M. A. (2009). Modeling and control of distillation column in a petroleum process. *Mathematical Problems in Engineering*, 2009, 1–14.
<https://doi.org/10.1155/2009/404702>

4. Tan, H., & Cong, L. (2023). Modeling and control design for distillation columns based on the equilibrium theory. *Processes*, 11(2), Article 607. <https://doi.org/10.3390/pr11020607>

5. Steffen, V. (2019). Distillation – modelling, simulation and optimization. Introductory chapter: Distillation. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88404>

MODELING OF DYNAMIC BEHAVIOR OF A RECTIFICATION COLUMN IN THE TECHNOLOGY OF PROCESSING SECONDARY OIL DISTILLATES

Boryn V.S.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7404-4964>
e-mail: borynvs@ukr.net

Shavranskyi M.V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6636-1069>
e-mail: mykhailo.shavranskyi@nung.edu.ua

Vabishchevich A.M.

Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-7698-5840>
e-mail: akit@nung.edu.ua

Abstract. The article considers the issue of modeling the dynamic behavior of a rectification column used in the technology of processing secondary oil distillates. The relevance of the study is due to the need to increase the efficiency of oil refining plants, ensure the stability of product quality and reduce energy consumption under variable operating conditions. An analysis of the features of the technological process of rectification of secondary oil fractions, in particular the influence of the composition of the raw material, thermal regimes and hydrodynamic parameters on the dynamic characteristics of the object, was carried out. A mathematical model of the rectification column was developed, which takes into account material and heat balances, nonlinearity of mass and heat transfer processes, as well as the relationships between the main technological variables. A system of differential equations was used to describe the dynamics, which allows reproducing transient processes when changing input parameters, such as raw material consumption, temperature and pressure. The model parameters were identified based on experimental or approximated industrial data. The dynamic properties of the distillation column were studied, including the analysis of transient characteristics, stability and sensitivity to disturbances. The results obtained allow us to assess the influence of control actions on the quality of component separation and determine the optimal operating modes of the unit. The proposed model can be used for further synthesis of automatic control systems and optimization of the technological process. The practical significance of the work lies in the possibility of using the developed model to increase the efficiency of distillation column control, reduce energy consumption and improve the quality of the final product at oil refineries.

Keywords: distillation column, dynamic modeling, secondary petroleum distillates, mathematical model, transient processes, automatic control, parameter identification.