

СИТНИКОВ О. В., ст. викл.; ДАНЬКЕВИЧ А. О., асп.; ЗАХАРЧУК А. С., студент  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## МОДЕЛЬ РЕАКТОРА КАТАЛІТИЧНОГО КРЕКІНГУ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

*Каталітичний крекінг у псевдозрідженому шарі – процес, який відіграє ключову роль в інтегрованих нафтопереробних виробництвах на основі первинного процесу конверсії необробленої нафти до легких продуктів. Стоїть задача розробки математичної моделі основного апарату – реактора. Проаналізовано параметри математичної моделі. Отриманий результат дослідження максимізує концентрацію бензину на виході з реактора, що дає можливість з меншої кількості нафти, отримати якіснішу продукцію*

**Ключові слова:** каталітичний крекінг, нафта, математична модель, реактор, передатна функція.

© Ситніков О. В., Данькевич А. О., Захарчук А. С., 2017.

**Постановка задачі та аналіз попередніх досліджень.** Процес каталітичного крекінгу почав розвиватись на початку ХХ-го століття. З того часу і до тепер було зроблено багато поліпшень для підвищення механічної надійності апарату і його здатності до переробки більш важкої сировини. Загальною науковою проблемою процесу каталітичного крекінгу в псевдозрідженому середовищі є перетворення за допомогою високої температури нафтових фракцій – газойлю до палива високої вартості (бензин, паливо для реактивних двигунів, дизельне паливо) [1, 2].

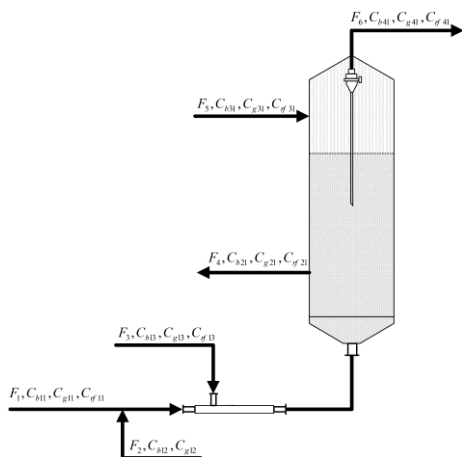
Сучасні процеси каталітичного крекінгу дозволяють одержувати компоненти бензину з більш високим октановим 270 числом, ніж традиційні установки з кульковим каталізатором. При цьому значно збільшується вихід цільового продукту (бензину і дизельного палива) [1, 2]. Розвиток процесу каталітичного крекінгу в найближчій перспективі визначатиметься, по-перше, реконструкцією існуючих установок каталітичного крекінгу з псевдозрідженим шаром каталізатора і, по-друге, модернізацією каталізаторів для установок каталітичного крекінгу з кульковим каталізатором і будівництвом нових установок каталітичного крекінгу важкої нафтової сировини за сучасними західними технологіями. Крім задач, пов'язаних з поліпшенням технології каталітичного крекінгу, необхідно вирішувати задачі по введенню нових потужностей каталітичного крекінгу як головного процесу, що дозволяє істотно поліпшити структуру нафтопродуктів, що випускаються.

Сировиною для каталітичного крекінгу служить газойль [3]. Технологічні процеси каталітичного крекінгу відрізняються один від одного станом шару каталізатора. В даний час існує три види установок: з нерухомим, фільтруючим шаром каталізатора, з завислим або киплячим шаром каталізатора, з рухомим каталізатором. Регенерація каталізатора в контактних апаратах з фільтруючим шаром каталізатора полягає в тому, що періодично зупиняється подача сировини і підводиться до них повітря для випалення коксу.

**Цілі статті.** Розробка математичної моделі реактора каталітичного крекінгу в псевдозрідженому середовищі, що дасть максимальну вихідну концентрацію бензину.

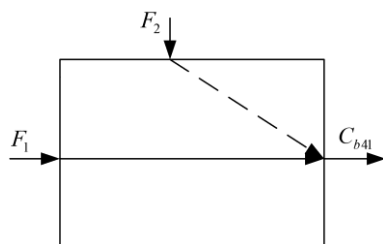
**Виклад основного матеріалу.** Процес каталітичного крекінгу є одним з найбільш поширених процесів поглибленої переробки нафти. Процес каталітичного крекінгу дає максимально можливий вихід – 50...80 %, високооктанового бензину і цінних зріджених газів. Отриманий під час процесу легкий газойль використовується як компонент дизельного палива, а важкий газойль з високим вмістом поліциклічної ароматики – як сировина для виготовлення технічного вуглецю або високоякісного електродного коксу. Основний процес переробки відбувається у реакторі, сировиною для якого зазвичай є широка фракція вакуумного газойля [3].

Процес каталітичного крекінгу в псевдозрідженому шарі проходить при високих температурах, тому використовується підігрів сировини трубчатою піччю. Промислові установки каталітичного крекінгу мають однотипну схему, але з різними типами реакторів (з часом удосконаленими). Для досліджень розглянемо процес каталітичного крекінгу в псевдозрідженому шарі з типом реактора 43...103 °С – з киплячим шаром каталізатора. В стояк реактора, діаметром 0,61...2,13 м та довжиною 23...37 м, подається потік каталізатора температурою 677...732 °С з регенератора, в потік каталізатора продувається сировина температурою 400 °С за допомогою водяної пари температурою 280...320 °С і тиском 0,4...1 МПа. В нижній частині реактора проходить кипіння отриманої суміші за температури 496...565 °С, і тиску 0,07...0,3 МПа, реакція проходить на протязі 3 с. У киплячому шарі реактора закінчується процес реакції, в сепараційній зоні реактора продукти реакції відділяються від каталізатора і надходять до блоку ректифікації. У відпарній колоні водяною парою відділяється каталізатор від вуглецю, який надходить далі до регенератора [1].



**Рис. 1 – Параметрична схема реактора у процесі каталітичного крекінгу в псевдозрідженому шарі.**

відпарник,  $C_{g21}$  – концентрація газойлю в потоці  $F_4$ , що надходить із реактора у відпарник,  $C_{rf21}$  – концентрація решти фракцій в потоці  $F_4$ , що надходить із реактора у відпарник,  $F_5$  – витрата суміші, що надходить у реактор із відпарника,  $C_{b31}$  – концентрація бензину в потоці  $F_5$ , що надходить із відпарник у реактора,  $C_{g31}$  – концентрація газойлю в потоці  $F_5$ , що надходить із відпарник у реактора,  $C_{rf31}$  – концентрація решти фракцій в потоці  $F_5$ , що надходить із відпарник у реактора,  $F_6$  – витрата продуктів реакції на виході із реактора (бензин, газойль, решта фракцій),  $C_{b41}$  – концентрація бензину у вихідному потоці  $F_6$ ,  $C_{g41}$  – концентрація газойлю у вихідному потоці  $F_6$ ,  $C_{rf41}$  – концентрація решти фракцій у вихідному потоці  $F_6$ .



**Рис. 2 – Структурно-параметрична схема реактора**

На основі параметричної схеми було розроблено структурно – параметричну схему, яка зображена на рис. 2.

Де  $F_I$  – керуюча дія,  $F_2$  – збурення,  $C_{b41}$  – регульована величина.

Проаналізувавши структурно-параметричну та параметричну схему реактора, отримуємо рівняння статички матеріального балансу за масовою витратою:

$$F_I - F_{II} + F_{III} - F_{IV} = 0; \quad (1)$$

$$\text{де } F_I = F_1 + F_2 + F_3; \text{ а } F_3 = (F_1 C_{g11} + F_2 C_{g12}) a_1;$$

$a_1$  – коефіцієнт перерахунку витрати решти фракцій на сировину.

Отримуємо систему рівнянь:

$$F_I = F_1 + F_2 + (F_1 C_{g11} + F_2 C_{g12}) a_1; \quad (2)$$

$$F_{II} = F_4;$$

$$F_{III} = F_5;$$

$$F_{IV} = F_6.$$

Враховуємо, що сумарні концентрації потоків дорівнюють 1:

$$C_{b12} + C_{g12} = 1;$$

$$C_{g21} + C_{b21} + C_{rf21} = 1;$$

$$C_{g31} + C_{b31} + C_{rf31} = 1;$$

$$C_{g41} + C_{b41} + C_{rf41} = 1.$$

Підставивши систему рівнянь (2) в рівняння (1) отримуємо рівняння статички матеріального балансу за масовою витратою:

$$F_1 + F_2 + (F_1 + F_2 C_{g12}) a_1 - F_4 + F_5 - F_6 = 0;$$

Рівняння динаміки матиме вигляд:

$$F_1(t) + F_2(t) + (F_1(t) + F_2(t) C_{g12}) a_1 - F_4(t) + F_5(t) - F_6(t) = M(t); \quad (3)$$

$M(t)$  – маса закомпульованої речовини.

Хімічне перетворення відбувається за формулою: Газойль  $\xrightarrow{\omega_{gb}}$  Бензин.

Рівняння хімічної кінетики матимуть вигляд [5]:

$$\frac{dC_g(t)}{dt} = \frac{1}{\Theta_1}(C_{gl}(t) - C_g(t)) - \omega_{gb}C_g(t) + \frac{1}{\Theta_2}(C_{g31}(t) - C_g(t)); \quad (4)$$

$$\frac{dC_b(t)}{dt} = \frac{1}{\Theta_1}(C_{bl}(t) - C_b(t)) + \omega_{gb}C_g(t) + \frac{1}{\Theta_2}(C_{b31}(t) - C_b(t)).$$

Рівняння динаміки матеріального балансу за масовою витратою (3) записуємо окремими компонентами: по бензину:

$$F_2(t)C_{b12}(t) - F_3(t)C_{b21}(t) + F_4(t)C_{b31}(t) - F_5(t)C_{b41}(t) = V\rho \frac{dC_{b41}(t)}{dt}; \quad (5)$$

по газойлю:

$$F_1(t) + F_2(t)C_{g12}(t) - F_3(t)C_{g21}(t) + F_4(t)C_{g31}(t) - F_5(t)C_{g41}(t) = V\rho \frac{dC_{g41}(t)}{dt};$$

по решті фракцій:

$$F_1(t) + F_2(t)C_{g12}(t)a_1 - F_3(t)C_{rf21}(t) + F_4(t)C_{rf31}(t) - F_5(t)C_{rf41}(t) = V\rho \frac{dC_{rf41}(t)}{dt}.$$

Рівняння (5) описують динаміку матеріальних потоків, а (4) динаміку хімічних перетворень, які перебувають у хімічному реакторі. Разом рівняння (4) та (5) являє повну систему, що описує масообмін в хімічному реакторі рівняннями. Виразивши з рівняння (5) зміну концентрації, доповнивши відповідні складові рівняння (4), отримуємо:

$$\frac{F_2(t)C_{b12}(t) - F_3(t)C_{b21}(t) + F_4(t)C_{b31}(t) - F_5(t)C_{b41}(t) + \frac{1}{\Theta_1}(C_{bl}(t) - C_{b41}(t)) + \omega_{gb}C_{g41}(t)}{V\rho} + \frac{\frac{1}{\Theta_2}(C_{b31}(t) - C_{b41}(t))}{V\rho} = \frac{dC_{b41}(t)}{dt}$$

$$\frac{F_1(t) + F_2(t)C_{g12}(t) - F_3(t)C_{g21}(t) + F_4(t)C_{g31}(t) - F_5(t)C_{g41}(t) + \frac{1}{\Theta_1}(C_{gl}(t) - C_{g41}(t)) - \omega_{gb}C_{g41}(t)}{V\rho} + \frac{\frac{1}{\Theta_2}(C_{g31}(t) - C_{g41}(t))}{V\rho} = \frac{dC_{g41}(t)}{dt}; \quad (6)$$

$$\frac{(F_1(t) + F_2(t)C_{g12}(t))a_1 - F_3(t)C_{rf21}(t) + F_4(t)C_{rf31}(t) - F_5(t)C_{rf41}(t)}{V\rho} = \frac{dC_{rf41}(t)}{dt}.$$

Записуємо перше рівняння по бензину:

$$F_1(t)C_{bl}(t) = F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t).$$

Виражаємо з даного рівняння  $C_{bl}(t)$  та розписуємо  $F_1(t)$ , отримуємо:

$$C_{bl}(t) = \frac{F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t)}{F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)}$$

Записуємо рівняння (6), підставивши в нього отримане рівняння:

$$\frac{F_2(t)C_{b12}(t) - F_3(t)C_{b21}(t) + F_4(t)C_{b13}(t) - F_5(t)C_{b14}(t)}{V\rho} + \frac{1}{\Theta_1} \left( \frac{F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t)}{F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)} - C_{b41}(t) \right) + \omega_{gb}C_{g41}(t) + \frac{1}{\Theta_2}(C_{b31}(t) - C_{b41}(t)) = \frac{dC_{b41}(t)}{dt};$$

Подаємо рівняння у приростах [5] і отримуємо:

$$\begin{aligned}
& \frac{\Delta F_2(t)C_{b12\_0} + \Delta C_{b12}(t)F_{2\_0} - \Delta F_3(t)C_{b21\_0} - \Delta C_{b21}(t)F_{3\_0} + \Delta F_4(t)C_{b31\_0} + \Delta C_{b31}(t)F_{4\_0}}{V\rho} \\
& - \frac{\Delta F_5(t)C_{b41\_0} + \Delta C_{b41}(t)F_{5\_0}}{V\rho} + \omega_{gb}\Delta C_{g41}(t) + \frac{1}{\Theta_2}(\Delta C_{b31}(t) - \Delta C_{b41}(t)) + \frac{1}{\Theta_1} \frac{F_{1\_0}\Delta C_{b11}(t) +}{F_{1\_0} + F_{2\_0} + F_{3\_0}} \\
& + \frac{F_{2\_0}\Delta C_{b12}(t)}{F_{1\_0} + F_{2\_0} + F_{3\_0}} + \frac{1}{\Theta_1} \frac{\partial(\frac{F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t)}{F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)})}{\partial F_1(t)} \Big|_{t=0} \Delta F_1(t) + \frac{1}{\Theta_1} \frac{\partial(\frac{F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t)}{F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)})}{\partial F_2(t)} \Big|_{t=0} \\
& \Delta F_2(t) + \frac{1}{\Theta_1} \frac{\partial(\frac{F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t)}{F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)})}{\partial F_3(t)} \Big|_{t=0} \Delta F_3(t) - \frac{1}{\Theta_1} \Delta C_{b41}(t) = \frac{d\Delta C_{b41}(t)}{dt};
\end{aligned}$$

позначимо:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{\Theta_1} \frac{\partial(\frac{F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t)}{F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)})}{\partial F_1(t)} \Big|_{t=0} = a_1; \\
& \frac{1}{\Theta_1} \frac{\partial(\frac{F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t)}{F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)})}{\partial F_2(t)} \Big|_{t=0} = a_2; \\
& \frac{1}{\Theta_1} \frac{\partial(\frac{F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t)}{F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)})}{\partial F_3(t)} \Big|_{t=0} = a_3.
\end{aligned}$$

З урахуванням позначень, останнє рівняння приймає вигляд:

$$\begin{aligned}
& \frac{\Delta F_2(t)C_{b12\_0} + \Delta C_{b12}(t)F_{2\_0} - \Delta F_3(t)C_{b21\_0} - \Delta C_{b21}(t)F_{3\_0} + \Delta F_4(t)C_{b31\_0} + \Delta C_{cb31}(t)F_{4\_0}}{V\rho} \\
& - \frac{\Delta F_5(t)C_{b41\_0} + \Delta C_{b41}(t)F_{5\_0}}{V\rho} + \omega_{gb}\Delta C_{g41}(t) + \frac{1}{\Theta_2}(\Delta C_{b31}(t) - \Delta C_{b41}(t)) + \frac{1}{\Theta_1} \frac{F_{1\_0}\Delta C_{b11}(t) +}{F_{1\_0} + F_{2\_0} + F_{3\_0}} \\
& + \frac{F_{2\_0}\Delta C_{b12}(t)}{F_{1\_0} + F_{2\_0} + F_{3\_0}} + a_1\Delta F_1(t) + a_2\Delta F_2(t) + a_3\Delta F_3(t) - \frac{1}{\Theta_1} \Delta C_{b41}(t) = \frac{d\Delta C_{b41}(t)}{dt};
\end{aligned}$$

Перетворивши за Лапласом та згрупувавши доданки з  $\Delta C_{b41}(p)$ , отримуємо:

$$\begin{aligned}
& \frac{\Delta F_2(p)C_{b12\_0} + \Delta C_{b12}(p)F_{2\_0} - \Delta F_3(p)C_{b21\_0} - \Delta C_{b21}(p)F_{3\_0} + \Delta F_4(p)C_{31\_0} + \Delta C_{31}(p)F_{4\_0}}{V\rho} \\
& - \frac{C_{b41\_0}}{V\rho} \Delta F_5(p) + \omega_{gb}\Delta C_{g41}(p) + \frac{1}{\Theta_2} \Delta C_{b31}(p) + \frac{1}{\Theta_1} \frac{F_{1\_0}\Delta C_{b11}(p) + F_{2\_0}\Delta C_{b12}(p)}{F_{1\_0} + F_{2\_0} + F_{3\_0}} + a_1\Delta F_1(p) + \\
& + a_2\Delta F_2(p) + a_3\Delta F_3(p) = (p + \frac{1}{\Theta_1} + \frac{1}{\Theta_2} + \frac{F_{5\_0}}{V\rho})\Delta C_{b41}(p);
\end{aligned}$$

Отримуємо передатні функції за каналом керування та збурення [6].

Передатна функція за каналом завдання-вихід матиме вигляд:

$$W_{\Delta F_1(p) \rightarrow \Delta C_{b41}(p)} = \frac{\Delta C_{b41}(p)}{\Delta F_1(p)} = \frac{a_1}{p + \frac{1}{\Theta_1} + \frac{1}{\Theta_2} + \frac{F_{5\_0}}{V\rho}} = \frac{\frac{a_1}{\frac{1}{\Theta_1} + \frac{1}{\Theta_2} + \frac{F_{5\_0}}{V\rho}}}{\frac{1}{\Theta_1} + \frac{1}{\Theta_2} + \frac{F_{5\_0}}{V\rho}} p + 1 = \frac{K_1}{Tp + 1},$$

$$\text{де } T = \frac{a_1}{\frac{1}{\Theta_1} + \frac{1}{\Theta_2} + \frac{F_{5-0}}{V\rho}}$$

Знайдемо значення  $a_1$ :

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{\Theta_1} \frac{\partial \left( \frac{F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t)}{F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)} \right)}{\partial F_1(t)} \Bigg|_{t=0} = \frac{1}{\Theta_1} \frac{\frac{\partial F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t)}{\partial F_1(t)} (F_1(t) + F_2(t) + F_3(t))}{(F_1(t) + F_2(t) + F_3(t))^2} \Bigg|_{t=0} - \\ &= \frac{1}{\Theta_1} \frac{\frac{\partial F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)}{\partial F_1(t)} (F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t))}{(F_1(t) + F_2(t) + F_3(t))^2} \Bigg|_{t=0} = \\ &= \frac{1}{\Theta_1} \frac{C_{b11-0}(F_{1-0} + F_{2-0} + F_{3-0}) - (F_{1-0}C_{b11-0} + F_{2-0}C_{b12-0})}{(F_{1-0} + F_{2-0} + F_{3-0})^2} \end{aligned}$$

коефіцієнт  $K_1$  набуває вигляду:

$$K_1 = \frac{C_{b11-0}(F_{1-0} + F_{2-0} + F_{3-0}) + (F_{1-0}C_{b11-0} + F_{2-0}C_{b12-0})}{\Theta_1(F_{1-0} + F_{2-0} + F_{3-0})^2 \frac{1}{\Theta_1} + \frac{1}{\Theta_2} + \frac{F_{5-0}}{V\rho}}$$

Передатна функція за каналом збурення – вихід матиме вигляд:

$$W_{\Delta F_2(p) \rightarrow \Delta C_{b41}(p)} = \frac{\Delta C_{b41}(p)}{\Delta F_2(p)} = \frac{C_{b12-0} + a_2}{p + \frac{1}{\Theta_1} + \frac{1}{\Theta_2} + \frac{F_{5-0}}{V\rho}} = \frac{\frac{C_{b12-0} + a_2}{\frac{1}{\Theta_1} + \frac{1}{\Theta_2} + \frac{F_{5-0}}{V\rho}}}{\frac{1}{\frac{1}{\Theta_1} + \frac{1}{\Theta_2} + \frac{F_{5-0}}{V\rho}} p + 1} = \frac{K_2}{Tp + 1},$$

де  $K_2 = (C_{b12-0} + a_2)T$ .

Знаходимо значення  $a_2$ :

$$\begin{aligned} a_2 &= \frac{1}{\Theta_1} \frac{\partial \left( \frac{F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t)}{F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)} \right)}{\partial F_2(t)} \Bigg|_{t=0} = \frac{1}{\Theta_1} \frac{\frac{\partial (F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t))}{\partial F_2(t)} (F_1(t) + F_2(t) + F_3(t)) -}{(F_1(t) + F_2(t) + F_3(t))^2} \Bigg|_{t=0} - \\ &= \frac{1}{\Theta_1} \frac{\frac{\partial (F_1(t) + F_2(t) + F_3(t))}{\partial F_2(t)} (F_1(t)C_{b11}(t) + F_2(t)C_{b12}(t))}{(F_1(t) + F_2(t) + F_3(t))^2} \Bigg|_{t=0} = \\ &= \frac{1}{\Theta_1} \frac{(C_{b12-0}(F_{1-0} + F_{2-0} + F_{3-0}) - (F_{1-0}C_{b11-0} + F_{2-0}C_{b12-0}))}{(F_{1-0} + F_{2-0} + F_{3-0})^2} \end{aligned}$$

А коефіцієнт  $K_2$  набуває вигляду:

$$K_2 = (C_{b12-0} + \frac{C_{b12-0}(F_{1-0} + F_{2-0} + F_{3-0}) - (F_{1-0}C_{b11-0} + F_{2-0}C_{b12-0})}{\Theta_1(F_{1-0} + F_{2-0} + F_{3-0})^2}) \frac{1}{\frac{1}{\Theta_1} + \frac{1}{\Theta_2} + \frac{F_{5-0}}{V\rho}}$$

**Висновки.** В результаті досліджень отримані коефіцієнти передатних функцій за відповідними каналами. Передатні функції математичної моделі реактора у процесі каталітичного крекінгу в псевдозрідженому середовищі по каналу керування та збурення мають вигляд аперіодичної ланки I-го порядку, в подальшому будуть використані при синтезі системи керування роботою реактора. Отже, отримана математична модель придатна для практичного використання.

Недоліком існуючих процесів каталітичного крекінгу є висока температура регенерації каталізатора крекінгу і окиснення оксиду вуглецю (625...670 °C), що знижує термін служби обладнання, активність і час роботи каталізатора крекінгу.

### **Список використаної літератури**

1. *Ахметов С. А.* Технология глубокой переработки нефти и газа: учебное пособие для вузов / С. А. Ахметов. – Уфа: Гилем, 2002. – 673 с.
2. *Суханов В. П.* Переработка нефти: издание второе, переработанное и дополненное / В. П. Суханов. – Москва: Высшая школа, 1979. – 336 с.
3. *Ахметов С. А.* Технология, экономика и автоматизация процессов переработки нефти / С. А. Ахметов, М. Х. Ишмияров, А. П. Веревкин, Е. С. Докучаев, Ю. М. Малышев. – М. : Химия, 2005. – 670с.
4. *Гаврилов А. И., Пашаева Б. А.* Интеллектуальная система управления каталитическим крекингом нефти // Интеллектуальные системы: Труды девятого международного симпозиума / Под ред. К. А. Пупков 2010. – С. 637–641.
5. *Бесекерский В. А.* Теория систем автоматического управления / Бесекерский В. А., Попов Е. П. –Москва, 1975. – 711 с.
6. *Pashayeva B.* Mathematical model of the fluid catalytic cracking for work in testing control systems for the cracking plant / PCI, Baku, Azerbaijan. – Vol. 1 – 2010. pp. 328–331.

Надійшла до редакції 05.10.2016