

УДК 66.012-52:661.525.3:532.135

**РЕОЛОГІЧНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРИ УПРАВЛІННІ АПАРАТОМ  
НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ****Стенцель Й. І., Поркуян О. В., Проказа О. І.****RHEOLOGICAL TRANSFORMATIONS IN THE CONTROL OF NEUTRALIZATION  
APPARATUS IN THE PRODUCTION OF AMMONIUM NITRATE****Stentcel J. I., Porkuyan O. V., Prokaza O. I.**

*Показано, що в апараті нейтралізації неконцентрованої азотної кислоти газоподібним аміаком мають місце реологічні перетворення маси реагуючих речовин, теплової енергії та кількості руху, котрі обумовлюють ефективність роботи апарату. Приведені фізичні моделі та графіки незворотних реологічних переходів і показано, що такі переходи мають ступінчастий вигляд і описуються інтегральними імпульсними дельта-функціями Дірака. Отримані математичні моделі апарату нейтралізації за концентрацією розчину аміачної селітри та температурою в реакційній склянці.*

**Ключові слова:** нейтралізація, селітра, реологія, перетворення, функція, модель, реакція.

Хімічні виробництва відносяться до складних систем, котрим притаманні такі ознаки, як технологічна цілісність, значні розміри, велика кількість виконуваних функцій, складність поведінки, велика кількість вхідних матеріальних і теплових потоків, вихідних координат (концентрації, температури, тиск, рівень), а також впливових, котрі створюють сукупність прямих і перехресних зв'язків, створюючи складну структуру системи зі своїм алгоритмом функціонування [11, 13-15]. Кожна з таких систем складається з певної кількості технологічних апаратів, які пов'язані між собою відповідною функціональною залежністю. Характерною рисою хімічних технологій є зміни, які виконуються в результаті дії багатьох факторів, а саме: форми, складу, фізичних і хімічних властивостей речовин тощо. Хіміко-технологічний процес формалізується як багатофазне багатокомпонентне середовище, розподілене в просторі та змінне в часі, для якого характерними є багатопараметричні об'єкти управління. При такій складності хімічних процесів однією з основних є проблема ефективності управління такими об'єктами, до яких відноситься й виробництво аміачної селітри.

В [1, 2, 5] описується спосіб управління складними багатопараметричними об'єктами, котрі

працюють в широкому діапазоні режимів та навантажень, в яких для регулювання декількох параметрів використовується одна керуюча дія. Відповідно до способу здійснюють формування по кожному керованому параметру за допомогою регулятора параметра керуючих сигналів, порівняння значень цих сигналів, вибір сигналу з найменшим значенням і здійснення цим сигналом регулювання виконавчого органу об'єкту, причому керуючий сигнал, як мінімум за одним керованим параметром формують шляхом підсумовування вихідного сигналу регулятора параметра і відповідного цьому параметру перетвореного вихідного сигналу.

**Постановка задачі розробки фізичних моделей.** Апарат нейтралізації являє собою циліндричну посудину, в якій розміщена реакційна склянка. Неконцентрована азотна кислота (НАК) та газоподібний аміак (ГПА) подаються в барботери, які розташовані в реакційній склянці один над одним. Барботери забезпечують зустрічну подачу реагентів у диспергованому стані. Реакційна склянка має внизу отвори, через котрі в неї поступає циркулюючий розчин плаву аміачної селітри (ПАС). Останній заповнює кільцевий простір між корпусом апарату та реакційною склянкою. Циркуляція розчину забезпечується виштовхуючою силою, яка створюється в реакційній зоні за рахунок пароутворення. Кратність циркуляції залежить від інтенсивності пароутворення, яка збільшується зі зростанням масової концентрації НАК та температури підігріву вихідних реагентів. Циркуляція позитивно впливає на повноту реакції нейтралізації. Реакція нейтралізації супроводжується значним виділенням теплоти, яка використовується для випаровування води, котра вноситься з НАК. У результаті кипіння розчину ПАС утворюється сокова пара, яка направляється до сепараторів сокової пари. Виходячи зі сказаного, в процесі нейтралізації протікає хімічний процес, який супроводжується масо- і теплоперенесенням.

Структурно фізичну модель процесу нейтралізації НАК ГПА можна подати у формі реологічних переходів, як показано на рис. 1. Згідно з теорією реологічних перетворень [4,8] процес нейтралізації супроводжується трьома фазовими реологічними переходами:

- 1) реологічний перехід НАК і ГПА в ПАС;
- 2) реологічний перехід теплоти реакції в нагрівання розчину ПАС та сокової пари;
- 3) реологічний перехід води, яка вноситься з НАК, в сокову пару.

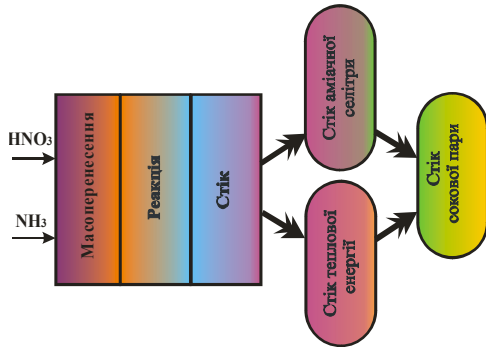


Рис. 1. Структурна схема фізичної моделі реологічних переходів процесу нейтралізації

**Фізична модель реологічного переходу НАК і ГПА в ПАС.** Нехай у деякій розглядуваній зоні апарату нейтралізації існує неоднорідне тіло (витрата матеріального потоку НАК і ГПА). Неоднорідність розподілення маси перенесення  $m(\vec{r}, \theta)$  приводить до відхилення від стану рівноваги системи і є причиною виникнення потоків перенесення маси. У цій зоні має місце макроскопічний рух речовин, який характеризується полем швидкостей  $v(\vec{r}, \theta)$ , де  $\vec{r}$  - вектор направленості руху перенесення;  $\theta$  - час перенесення [1, 5]. Перенесення маси  $m$  матеріального потоку через деяку поверхню  $S$  розглядуваного об'єму  $V$  реакційної склянки складається з перенесення за рахунок молекулярної дифузії речовин і конвекційного перенесення. Таким чином, рівняння для сумарного потоку перенесення маси матеріального потоку  $F$  можна записати у вигляді

$$\vec{F} = m\vec{v} + \vec{q}. \quad (1)$$

В інтегральній формі умовою зберігання маси для даного об'єму  $V$  буде

$$\int_V \frac{\partial m}{\partial \theta} dV = -\oint_S F df + \int_V \vec{\gamma} dV, \quad (2)$$

де  $df = n dV$  - елемент поверхні;  $n$  - одиничний вектор елемента  $dV$ ;  $\vec{\gamma}$  - вектор стоку аміачної селітри.

Використовуючи теорему Остроградського-Гауса, інтеграл за поверхнею може бути перетворений в інтеграл за об'ємом

$$\oint_{(S)} F df = \int_{(V)} \text{div} F dV. \quad (3)$$

Співвідношення (2) з урахуванням (3) можна записати таким чином

$$\int_{(V)} \left[ \frac{\partial m}{\partial \theta} + \text{div} F - \gamma \right] dV = 0. \quad (4)$$

Для того, щоби рівність (4) справджувалася для довільного об'єму  $V$ , необхідно, щоби вираз у квадратних дужках тотожно дорівнював нулю. Тобто

$$\frac{\partial m}{\partial \theta} + \text{div} F - \gamma = 0. \quad (5)$$

З урахуванням співвідношення (1) рівняння (5) приймає таку форму

$$\frac{\partial m}{\partial \theta} + \text{div}(m\vec{v}) = -\text{div}\vec{q} + \vec{\gamma}. \quad (6)$$

Так як у розглядуваному об'ємі має місце взаємодія двох речовин, то, позначивши:  $m_i(\vec{r}, \theta)$  - маса  $i$ -ої речовини;  $v_i(\vec{r}, \theta)$  - швидкість руху  $i$ -ої речовини в напрямку масоперенесення;  $\gamma_C(\vec{r}, t)$  - інтенсивність стоку плаву аміачної селітри в одиниці об'єму і напрямку руху вектора  $\vec{r}$  за одиницю часу  $t$ , рівняння перенесення маси приймає наступну форму

$$\frac{\partial m_i}{\partial \theta} + \text{div}(m_i \vec{v}_i) = -\text{div}(D_i \nabla m_i) + \gamma_{AC}, \quad (7)$$

де  $D_i$  - ефективний коефіцієнт масоперенесення  $i$ -ї речовини;  $\nabla$  - лінійний оператор.

Нехай макроскопічний рух речовини незначний і швидкість  $\vec{v}_i(\vec{r}, \theta) \rightarrow 0$ . Тоді рівняння перенесення кількості маси спрощується і приймає вигляд

$$\frac{\partial m_i}{\partial \theta} = -\text{div}(D_i \nabla m_i) + \gamma_C \quad (8)$$

Якщо коефіцієнт дифузії мало залежить від процесу масоперенесення реагуючих речовин, то рівняння (8) спрощується і приймає вигляд

$$\frac{\partial m_i}{\partial \theta} = -D_i \nabla^2 m_i + \gamma_C,$$

або

$$\frac{\partial m_i}{\partial \theta} + D_i \nabla^2 m_i = \gamma_C, \quad (9)$$

де  $\nabla^2$  - оператор Лапласа (лапласіан).

Ліва частина рівняння (9) характеризує масоперенесення в рідинній фазі, а права – процес створення нової речовини (плаву аміачної селітри). Якщо прийняти до уваги, що в рідинній фазі молекулярна та конвекційна складова процесу перенесення маси протікають одночасно [14, 15], то рівняння (9) набуває такої форми

$$\frac{\partial m_i}{\partial \theta} + D_i \nabla^2 m_i + v_i \nabla m_i = \gamma_{AC} \cdot \quad (10)$$

Прийmemo до уваги, що процес нейтралізації з моменту початку реакції до її закінчення є неперервним і незворотним. У результаті створюється плав аміачної селітри, який володіє новими фізико-хімічними властивостями, а саме: густиною, в'язкістю, молекулярною масою, розчинністю тощо. Фізична модель такого реологічного переходу показана на рис. 2,а. Графіки незворотних реологічних перетворень реологічного переходу показані на рис. 2, б, в і г. Речовини з масами  $m_i$  завдяки молекулярному і конвекційному перенесенню в області фазового переходу зазнають хімічного перетворення (деформації) (рис. 2, б). До області фазового переходу маси речовин мають максимальне значення, а після неї вони відсутні.

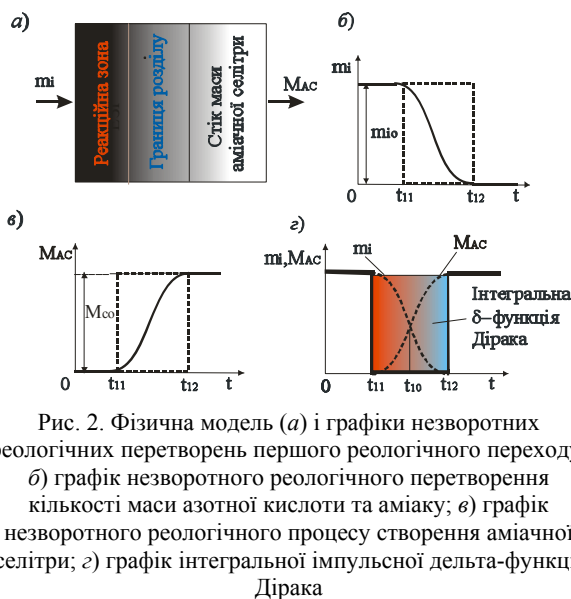


Рис. 2. Фізична модель (а) і графіки незворотних реологічних перетворень першого реологічного переходу: б) графік незворотного реологічного перетворення кількості маси азотної кислоти та аміаку; в) графік незворотного реологічного процесу створення аміачної селітри; г) графік інтегральної імпульсної дельта-функції Дірака

Такий процес є незворотним та описується розривною функцією. Математична модель такого процесу являє собою ступінчасту функцію, що описується таким рівнянням

$$m_i(t) = \begin{cases} 1 & t \leq t_{11}; \quad t_{11} < t_{12}; \\ 0 & t \geq t_{12}; \quad t_{11} < t_{10} < t_{12}, \end{cases} \quad (11)$$

де  $t$  - час хімічного перетворення;  $t_{10}$  - середнє значення часу фазового переходу;  $t_{11}, t_{12}$  - час проходження границь фазового переходу.

Процес утворення ПАС також є незворотним (рис. 2, в). До області фазового переходу маса

аміачної селітри  $M_{AC}$  є відсутньою, а після неї набуває максимального значення. Отже, має місце розривний процес, який можна описати таким рівнянням

$$M_{AC}(t) = \begin{cases} 1 & t \geq t_{12}; \\ 0 & t < t_{11}. \end{cases} \quad (12)$$

Реологічне перетворення речовин показано на рис. 2, г. На границі розділу має місце перетворення мас реагуючих речовин у масу ПАС. При цьому можна виділити умовну границю розділу між часом  $t_{11}$  і  $t_{12}$ . У цій області проходить процес перетворення, який може бути описаний інтегральною імпульсною дельта-функцією Дірака. Згідно з теорією узагальнених функцій похідна ступінчастої функції приводить до символічної рівності

$$\delta(t) = \frac{\partial}{\partial t} f(t), \quad (13)$$

де  $\delta(t)$  - дельта-функція Дірака;  $f(t)$  - деяка функція, яка описує процес реологічного перетворення в реакційній зоні нейтралізатора.

Якщо функція  $f(t)$  описує процес утворення ПАС зі спадковістю, то функція Дірака є асиметричною та описується рівнянням (рис. 2, г)

$$\int_{t_{11}+0_1}^{t_{12}} f_1(\xi) \delta(\xi - t_{10}) d\xi = \begin{cases} 0 & t_{10} < t_{11}, t_{10} \geq t_{12}; \\ f_1(t_{10} + 0_1) & t_{11} < t_{10} < t_{12}, \end{cases} \quad (14)$$

де  $\xi$  - деяка змінна;  $\delta(\xi - t_{10})$  - ядро лінійного інтегрального перетворення.

Такий фазовий реологічний перехід описується рівнянням у вигляді

$$f_1(\xi) = \frac{\partial m_i}{\partial t} + D_i \nabla^2 m_i + v_i \nabla m_i, \quad (15)$$

де  $D_i$  - ефективний коефіцієнт масоперенесення  $i$ -ї реагуючої речовини.

**Фізична модель перетворення теплоти реакції.** Нехай у деякій розглядуваній зоні апарату нейтралізації протікає реакція, в результаті чого створюється ПАС та виділяється значна кількість тепла за рахунок реакції. Тепло використовується для випаровування води, яка вноситься з НАК. Неоднорідність розподілення потенціалу перенесення  $\varphi(\vec{r}, \theta)$  призводить до відхилення від стану рівноваги системи і є причиною виникнення потоків перенесення теплової енергії. У цій зоні має місце макроскопічний рух теплової енергії, який характеризується полем швидкостей  $v(\vec{n}, \mathcal{G})$ , де  $\vec{n}$  - вектор направленості руху перенесення;  $\mathcal{G}$  - час фазового переходу води в пару [10, 11].

Перенесення теплової енергії через деяку поверхню  $S$  розглядуваного об'єму  $V$  реакційної

склянки складається з перенесення за рахунок конвекційного перенесення теплової енергії та термодифузії. Таким чином, рівняння для сумарного потоку перенесення теплової енергії  $F$  можна записати у вигляді

$$\bar{F} = \bar{\varphi}v + \bar{q}. \quad (16)$$

В інтегральній формі умовою зберігання теплової енергії для даного об'єму  $V$  буде

$$\int_V \frac{\partial \varphi}{\partial \vartheta} dV = - \oint_S \bar{F} df + \int_V \bar{\gamma}_T dV, \quad (17)$$

де  $df = n dV$  - елемент поверхні;  $n$  - одиничний вектор елемента  $dV$ ;  $\bar{\gamma}_T$  - вектор стоку теплової енергії.

Використовуючи теорему Остроградського-Гауса, інтеграл за поверхнею може бути перетворений в інтеграл за об'ємом

$$\oint_{(S)} \bar{F} df = \int_{(V)} \text{div} \bar{F} dV. \quad (18)$$

Співвідношення (17) з урахуванням (18) може бути записано в такій еквівалентній формі

$$\int_{(V)} \left[ \frac{\partial \varphi}{\partial \vartheta} + \text{div} F - \gamma_T \right] dV = 0. \quad (19)$$

Для того, щоб рівність (19) справджувалася для довільного об'єму  $V$ , необхідно, щоб підінтегральний вираз тотожно дорівнював нулю. Тобто

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \vartheta} + \text{div} F - \gamma_T = 0. \quad (20)$$

З урахуванням співвідношення (16), рівняння (20) приймає таку форму

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \vartheta} + \text{div}(\bar{\varphi}v) = -\text{div} \bar{q} + \bar{\gamma}_T. \quad (21)$$

Прийнявши, що потенціал перенесення теплової енергії  $\varphi = M_{AC} c_{AC} T$ , і позначивши:  $M_{AC}(\bar{n}, \theta)$  - маса теплоносія;  $c_{AC}(\bar{n}, \theta)$  - теплоємність ПАС;  $T_p(\bar{n}, \theta)$  - температура реакції;  $v_T(\bar{n}, \theta)$  - швидкість зміни теплової енергії;  $\gamma_T(\bar{r}, t)$  - інтенсивність стоку теплової енергії в одиниці об'єму й напрямку руху вектора  $\bar{n}$  за одиницю часу  $t$ , рівняння перенесення кількості теплової енергії приймає наступну форму

$$\frac{\partial}{\partial \vartheta} (M_{AC} c_{AC} T_p) + \text{div} (M_{AC} c_{AC} T_p v_T) = -\text{div}(\bar{q}) + \bar{\gamma}_T. \quad (22)$$

В якості співвідношення, яке визначає незворотний потік перенесення, використовується градієнтний закон Фур'є:  $q = \lambda \nabla T$ . При цих

припущеннях рівняння перенесення теплової енергії має вигляд

$$\frac{\partial}{\partial \vartheta} (M_{AC} c_{AC} T_p) + \text{div} (M_{AC} c_{AC} T_p v_T) = -\text{div}(\lambda_{AC} \nabla T_p) + \gamma_T, \quad (23)$$

де  $\lambda_{AC}$  - коефіцієнт теплопровідності ПАС.

Рівняння перенесення теплоти у формі (23) є нелінійним і достатньо складним для аналізу. Тому при дослідженні вводиться припущення щодо сталості маси й теплоємності. Тоді рівняння приймає наступну форму

$$\frac{\partial T_p}{\partial \vartheta} + \text{div}(T_p v_T) = -\text{div}(a_{AC} \nabla T_p) + \frac{\gamma_T}{M_{AC} c_{AC}}, \quad (24)$$

де  $a_{AC} = \lambda_{AC} / M_{AC} c_{AC}$  - коефіцієнт температуропровідності ПАС.

Рівняння, яке описує перенесення теплоти в потоці рідини ( $\text{div} v_T = 0$ ), має вигляд:

$$\frac{\partial T_p}{\partial \vartheta} + v_T \nabla T_p = -\text{div}(a_{AC} \nabla T_p) + \frac{\gamma_T}{M_{AC} c_{AC}} \quad (25)$$

Якщо коефіцієнт температуропровідності можна вважати сталим, то рівняння теплопровідності спрощується й приймає вигляд

$$\frac{\partial T_p}{\partial \theta} = -a_{AC} (\nabla^2 T_p + \lambda_{AC}). \quad (26)$$

Якщо прийняти, що в рідинній фазі ПАС молекулярна й конвекційна складова процесу перенесення теплової енергії протікають одночасно [3, 4], то рівняння (26) приймає наступну форму

$$\left( \frac{\partial T_p}{\partial \theta} + a_{AC} \nabla^2 T_p + v_T \nabla T_p + \lambda_{AC} \right) = \gamma_T. \quad (27)$$

Рівняння (27) описує фізико-хімічний процес теплоперенесення від реакційної зони до розчину ПАС за лінійними координатами реакційної склянки. Ліва частина рівняння характеризує теплоперенесення в рідинній фазі, а права - процес стоку теплової енергії. Візьмемо до уваги, що хімічний процес з моменту початку реакції до її закінчення є неперервним і незворотним. У результаті реакції виділяється значна кількість теплової енергії, котра витрачається на випаровування води, яка вноситься в апарат з НАК. Фізична модель такого процесу наведена на рис. 3, а. Графіки незворотних реологічних перетворень реологічного переходу показані на рис. 3, б, в, г.

У результаті реакції виділяється значна кількість теплової енергії в області фазового переходу (рис. 3, б). До області фазового переходу тепла енергія реакції відсутня, після неї приймає максимальне значення. Такий процес є незворотним та описується розривною функцією. Математична модель процесу створення теплової енергії  $Q_p(t)$

являє собою ступінчасту функцію, яка описується таким рівнянням

$$Q_P(t) = \begin{cases} 1 & t \geq t_{22}; \\ 0 & t < t_{21}, \end{cases} \quad (28)$$

де  $t$  - час хімічного перетворення;  $t_{20}$  - середнє значення часу фазового переходу;  $t_{21}$ ,  $t_{22}$  - час між вхідною та вихідною границями фазового переходу.

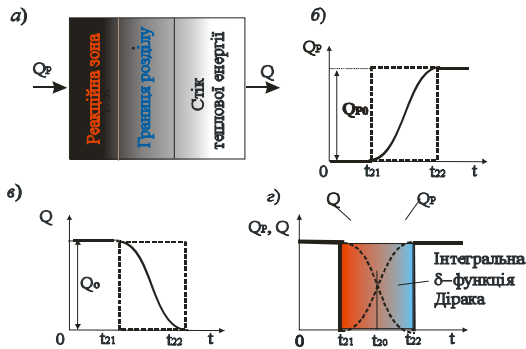


Рис. 3. Фізична модель (а) і графіки незворотних реологічних перетворень другого реологічного переходу: б) графік незворотного реологічного процесу створення теплової енергії за рахунок реакції; в) графік незворотного реологічного процесу стоку теплової енергії, яка витрачається на випаровування; г) графік інтегральної імпульсної дельта-функції Дірака для другого реологічного переходу

Процес стоку теплової енергії  $Q(t)$  також є незворотним (рис. 3, в). До області фазового переходу кількість теплоти є максимальною, а після неї вона зменшується на кількість теплоти, яка виходить з отриманим продуктом та соковою парою. Таким чином, має місце розривний процес, який можна описати рівнянням у вигляді

$$Q(t) = \begin{cases} 1 & t \leq t_{21}; \quad t_{21} < t_{22}; \\ 0 & t \geq t_{22}; \quad t_{21} < t_{20} < t_{22}. \end{cases} \quad (29)$$

Реологічне перетворення теплової енергії показано на рис. 3, г. При цьому можна умовно виділити границю розділу між часом  $t_{21}$  і  $t_{22}$ . У цій області проходить реологічний процес пароутворення, який може бути описаний інтегральною імпульсною  $\delta$ - функцією Дірака. Згідно з теорією узагальнених функцій похідна ступінчастої функції приводить до символічної рівності

$$\delta(t) = \frac{\partial}{\partial t} f(t), \quad (30)$$

де  $\delta(t)$  - дельта функція Дірака;  $f(t)$  - деяка функція, яка описує реологічний перехід.

Якщо функція  $f(t)$  описує процес перенесення теплової енергії зі спадковістю, то

функція Дірака є асиметричною й описується наступним рівнянням (рис. 2.3, з):

$$\int_{t_{21}+0_2}^{t_{22}} f_2(\xi) \delta(\xi - t_{20}) d\xi = \begin{cases} 0 & t_{20} < t_{21}, \quad t_{20} \geq t_{22}; \\ f_2(t_{20} + 0_2) & t_{21} < t_{20} < t_{22}, \end{cases} \quad (31)$$

де  $\xi$  - змінна;  $\delta(\xi - t_{20})$  - ядро лінійного інтегрального перетворення.

Такий фазовий перехід описується рівнянням у вигляді

$$f_2(\xi) = M_{AC} c_{AC} \left( \frac{\partial T_P}{\partial t} + a_{AC} \nabla^2 T_P + v_T \nabla T_P \right), \quad (32)$$

де  $a_{AC}$  - коефіцієнт температуропровідності розчину аміачної селітри.

Процес перетворення НАК з концентрацією  $Q_1$  в аміачну селітру з концентрацією  $Q_{AC}$  може бути описаний наступним рівнянням

$$V \frac{dQ_{AC}}{dt} + \left[ F_{AC} + VK_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_P}\right) \right] Q_{AC} =, \quad (33) \\ = F_{AK} Q_{AK} + F_A Q_A$$

де  $V$  - об'єм реакційної маси в склянці;  $F_{AC}$  - об'ємна витрата стоку аміачної селітри;  $K_0$  - стала швидкості реакції;  $E$  - енергія активації;  $R$  - універсальна газова стала;  $T_P$  - температура реакції;  $F_{AK}$  - об'ємна витрата азотної кислоти;  $Q_{AC}$  - поточна концентрація аміачної селітри;  $F_A$  - масова концентрація аміаку;  $Q_A$  - концентрація аміаку.

Нехай  $Q_{AK} = k_P Q_{AC}$ , де  $k_P$  - коефіцієнт перетворення. Якщо  $k_P \approx 1$ , то при  $Q_{AC} = M_{AC} / V$  і  $F_{ХП} = VK_0 \exp(-E / RT)$ , з (33) рівняння для стоку маси аміачної селітри має вигляд

$$\tau_{12} \frac{dM_{AC}}{dt} + M_{AC} = k_1 M_{ACO}, \quad (34)$$

де  $\tau_{12} = V / F_{AC}$  - стала часу стоку;  $k_1 = V(F_{ХП} / F_{AC})$  - коефіцієнт передачі,  $M_{AC}$ ,  $M_{ACO}$  - поточна та максимально можлива маса аміачної селітри.

Продиференціювавши рівняння (34) за часом  $t$ , знаходимо швидкість стоку аміачної селітри в такому вигляді

$$\gamma_c(t) = \tau_{12} \frac{d^2 M_{AC}}{dt^2} + \frac{dM_{AC}}{dt}. \quad (35)$$

Підставивши (35) у рівняння (15), з врахуванням того, що за лінійними координатами реакційної склянки маса (концентрація) аміачної селітри збільшується, отримуємо

$$\frac{\partial m_i}{\partial \theta} + D_i \nabla^2 m_i + v_i \nabla m_i = \tau_{12} \frac{d^2 M_{AC}}{dt^2} + \frac{dM_{AC}}{dt}. \quad (36)$$

Нехай процес хімічного перетворення в реакційній склянці від барботера по її висоті проходить за принципом поршневої моделі у напрямку  $x$ . Тоді диференціальне рівняння, яке описує процес масоперенесення кількості реакційної маси матиме вигляд

$$\frac{\partial m_i(x, \theta)}{\partial \theta} + D_i \frac{\partial^2 m_i(x, \theta)}{\partial x^2} + v_i \frac{\partial m_i(x, \theta)}{\partial x} = \tau_{12} \frac{d^2 M_{AC}}{dt^2} + \frac{dM_{AC}}{dt} \quad (37)$$

Конструктивно реакційна склянка виконана таким чином, що процес хімічного перетворення реакційних компонентів (азотної кислоти та аміаку) проходить при рівномірному русі цієї маси вгору за рахунок створеної пари і закінчується на висоті склянки  $L = 4 \text{ м}$ . Одночасно рух реакційної маси вгору за висотою  $x = L$  визначає час  $\theta$  її перебування в апараті. Приймаючи до уваги, що рух реакційної маси по висоті склянки є рівномірним і виконується зі швидкістю  $v_i = \partial x / \partial \theta$  або  $\partial x = v_i \partial \theta$ , то рівняння (37) приводиться до такої форми

$$\frac{D_i}{v_i^2} \frac{\partial^2 m_i(\theta)}{\partial \theta^2} + 2 \frac{\partial m_i(\theta)}{\partial \theta} = \tau_{12} \frac{d^2 M_{AC}}{dt^2} + \frac{dM_{AC}}{dt} \quad (38)$$

Диференціальне рівняння (37) є нелінійним і може мати аналітичний розв'язок, використовуючи метод нульового градієнта. Рівняння (37) запишемо в такій формі

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{D_i}{v_i^2} \frac{\partial m_i(\theta)}{\partial \theta} + 2m_i(\theta) \right] = \frac{d}{dt} \left[ \tau_{12} \frac{dM_{AC}(t)}{dt} + M_{AC}(t) \right] \quad (39)$$

У рівнянні (39) позначимо:

$$\frac{D_i}{v_i^2} \frac{\partial m_i(\theta)}{\partial \theta} + 2m_i(\theta) = \varphi(\theta)$$

і

$$\tau_{12} \frac{dM_{AC}(t)}{dt} + M_{AC}(t) = \varphi(t),$$

де  $\varphi(\theta)$  і  $\varphi(t)$  - функції, котрі описують одночасний процес створення та стоку маси аміачної селітри. Підставивши ці функції в (39) і враховуючи, що похідні функцій  $\varphi(\theta)$  і  $\varphi(t)$  за часом є інтегральними імпульсними дельта-функціями Дірака з ядром  $\varphi(x, \theta)$  і  $\varphi(t)$  відповідно, отримуємо наступну систему лінійних диференціальних рівнянь:

$$\frac{D_i}{2v_i^2} \frac{\partial m_i(\theta)}{\partial \theta} + m_i(\theta) = M_{0AC}; \quad (40)$$

$$\tau_{12} \frac{dM_{AC}(t)}{dt} + M_{AC}(t) = m_{0i}, \quad (41)$$

де  $M_{0AC}$ ,  $m_{0i}$  - номінальні маси аміачної селітри та реагуючих компонентів відповідно.

Рівняння (40) описує процес одночасного перенесення маси реагуючих компонентів, а (41) - процес стоку готового розчину аміачної селітри. Враховуючи, що в процесі хімічного перетворення побічних продуктів не створюється, то кількість маси реагуючих компонентів буде пропорційною кількості маси створюваної аміачної селітри. Тобто можемо записати наступну рівність:  $m_i(\theta) = k_m M_{AC}(t)$ . Припускаючи, що часткова похідна при таких умовах дорівнює повній похідній, рівняння (40) набуває такої форми

$$\tau_{22} \frac{dM_{AC}(\theta)}{d\theta} + M_{AC}(\theta) = 0, \quad (42)$$

де  $\tau_{22} = D_i / 2v_i^2$  - стала часу процесу хімічного перетворення.

При відповідних початкових умовах рішенням рівняння (41) буде

$$M_{AC}(t) = M_{AC0} [1 - \exp(-t / \tau_{12})], \quad (43)$$

а рішенням рівняння (42)

$$M_{AC}(\theta) = M_{AC}(t) [1 - \exp(-\theta / \tau_{22})]. \quad (44)$$

Підставивши (43) у рівняння (44), отримуємо математичну модель процесу хімічного перетворення азотної кислоти й аміаку в аміачну селітру в такій формі

$$M_{AC}(\theta) = M_{AC0} [1 - \exp(-t / \tau_{12})] [1 - \exp(-\theta / \tau_{22})]. \quad (45)$$

Так як процес хімічного перетворення та стоку протікають практично одночасно, то після відповідних перетворень отримуємо

$$M_{AC}(t) = M_{AC0} \left\{ \frac{1 - \exp(-t / \tau_{12})^*}{[1 + \exp[(t / \tau_{22})(1 - k_{zM})]] + \exp[-(t / \tau_{22})(1 + k_{zM})]} \right\} \quad (46)$$

де

$$k_{zM} = \frac{\tau_{22}}{\tau_{12}} = \frac{D_i}{2F_{AK}} L \left( \frac{S_H}{L} \right) \left[ \frac{1}{1 + k_A + k_B} \right]^2 (1 + k_{AC}) \quad (47)$$

- коефіцієнт відношення сталих часу процесу масоперенесення хімічного перетворення  $\tau_{22}$  та стоку  $\tau_{12}$ ;

$k_A = F_A / F_{AK}$  - коефіцієнт співвідношення витрат азотної кислоти та аміаку;

$k_{AC} = F_{AC} / F_{AK}$  - коефіцієнт співвідношення витрат аміачної селітри та азотної кислоти;

$k_{ХП} = F_{ХП} / F_{AK}$  коефіцієнт співвідношення витрати продукту хімічного перетворення та азотної кислоти.

Приймаючи до уваги, що  $\tau_{12} = \tau_{22} / k_{cm}$ , а  $\tau_{22} = D_i / 2v_i^2$ , рівняння (46) приймає наступну форму

$$M_{AC}(t) = M_{ACO} \left\{ \frac{1 - \exp(-2t(v_i/D_i)k_{cm})}{1 + \exp[2t(v_i/D_i)(1-k_{cm})]} + \exp[-2t(v_i/D_i)(1+k_{cm})] \right\}. \quad (48)$$

З рівняння (48) випливає, що забезпечення загального матеріального балансу процесу нейтралізації можна виконувати не тільки за стабілізацією співвідношення витрати азотної кислоти й аміаку, а також за співвідношенням сталей часу  $k_{cm} = \tau_{22} / \tau_{12}$ , які характеризують власне процес хімічного перетворення та стік аміачної селітри. Окрім того з метою керування процесом нейтралізації можна використовувати лінійну швидкість  $v_i$  переміщення розчину аміачної селітри за висотою склянки нейтралізатора.

Рівняння теплового балансу процесу нейтралізації (25) можна записати в такій формі

$$m_H c_H \frac{dT_p(t)}{dt} + F_{AC} c_{AC} T_p(t) + F_{СП} c_{СП} T_p(t) + rV_H K_0 \exp(-E/RT_p) Q_{AC} = F_A c_A T_A + F_{AK} c_{AK} T_{AK}, \quad (49)$$

де  $c_A$  - теплоємність газоподібного аміаку;  $T_A$  - температура газоподібного аміаку;  $c_{AK}$  - теплоємність НАК;  $T_{AK}$  - температура НАК;  $V$  - об'єм реакційної маси;  $T_p$  - температура реакції;  $r$  - теплотворна здатність реакції;  $Q_{AC}$  - концентрація аміачної селітри в реакційній масі;  $m_H$ ,  $c_H$  - маса та теплоємність реакційної речовини;  $c_{AC}$ ,  $T_{AC}$  - теплоємність і температура розчину аміачної селітри;  $c_{СП}$ ,  $T_{СП}$  - теплоємність і температура сокової пари.

Теплова енергія, котра створюється в процесі хімічного перетворення, має накопичувальний характер, так як вона не тільки використовується для проходження реакції, але й накопичується в розчині аміачної селітри та соковій парі. Тому швидкість стоку теплової енергії з реакційної зони можна описати наступним диференціальним рівнянням

$$\gamma_T(t) = \frac{d}{dt} (\tau_{T2}^2 \frac{d^2 T_p(t)}{dt^2} + \tau_{T1} \frac{dT_p(t)}{dt} + T_p(t)), \quad (50)$$

де  $\tau_{T1}$ ,  $\tau_{T2}$  - сталі часу.

Використовуючи рівняння (50), маємо

$$\frac{\partial T_p(\xi, \theta)}{\partial \theta} + D_T \frac{\partial^2 T_p(\xi, \theta)}{\partial \xi^2} = \frac{d}{dt} \left( \tau_{T2}^2 \frac{d^2 T_p(t)}{dt^2} + \tau_{T1} \frac{dT_p(t)}{dt} + T_p(t) \right). \quad (51)$$

Згідно з методом нульового градієнта [4] нелінійне диференціальне рівняння (51) можна замінити на систему наступних рівнянь:

$$\frac{\partial T_p(\xi, \theta)}{\partial \theta} = -D_T \frac{\partial^2 T_p(\xi, \theta)}{\partial \xi^2}; \quad (52)$$

$$\tau_{T2}^2 \frac{d^2 T_p(t)}{dt^2} + \tau_{T1} \frac{dT_p(t)}{dt} + T_p(t) = K_T T_p(\xi, \theta). \quad (53)$$

Якщо швидкість зміни температури  $T(\xi, \theta)$  як за часом, так і за напрямком є однаковою, то рівняння (52) спрощується і приймає наступну форму

$$\tau_{TD} \frac{\partial T_p(\theta)}{\partial \theta} + T_p(\theta) = T_{P0}, \quad (54)$$

де  $\tau_{TD} = S/D_T$  - стала часу конвекційного перенесення теплової енергії через поперечний перетин реакційної склянки;  $T_{P0}$  - номінальна температура реакції.

При таких умовах рішенням рівняння (54) буде

$$T_p(\theta) = T_{P0} \exp(-\theta / \tau_{TD}). \quad (55)$$

Так як в реакційній склянці температурний режим стабілізується шляхом введення холодної сокової пари, то температура аміачної селітри, яка виводиться зі склянки, має слабо виражений коливальний характер, а значить можна прийняти, що у рівнянні (53) відношення  $\tau_{T1} / \tau_{T2} < 2$ . У такому випадку рішення рівняння (53) буде наступним

$$T_p(t) = T_p(\theta) \left[ 1 - \exp(\alpha t) \left[ \cos(\omega_0 t) + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \right] \right], \quad (56)$$

де  $\alpha = -\tau_{T1} / 2\tau_{T2}^2$  - ступінь загасання температурного поля в реакційній склянці;  $\omega_0 = \sqrt{1/\tau_{T2}^2 - (\tau_{T1} / 2\tau_{T2}^2)^2}$  - частота власних коливань температурного поля.

Підставивши рівняння (55) у (56), отримуємо

$$T_p(t) = k_T T_{P0} \exp(-\theta D_T / S) * \left[ 1 - \exp(\alpha t) \left[ \cos(\omega_0 t) + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \right] \right]. \quad (57)$$

Прийнявши до уваги, що  $\theta = V \rho_{AK} (1 - Q_K) / F_{AK}^M$  - час перебування реагентів в реакційній склянці;  $F_{AK}^M$  - масова витрата розчину азотної кислоти, яка подається в реакційну зону склянки;  $V$  - об'єм реакційної склянки;  $\rho_{AK}$  - густина розчину азотної кислоти;  $Q_{AC}$  - концентрація аміачної селітри, рівняння (57) приймає наступний вигляд



$$T_p(t) = k_T T_{p0} \exp \left[ -\frac{L \rho_{AK} (1 - Q_{AC}) D_T}{F_{AK}^M} \right] * \left( 1 - \exp(-\alpha t) \left[ \cos(\omega_0 t) + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \right] \right), \quad (58)$$

де  $L$  - висота розчину аміачної селітри в реакційній склянці.

**Висновки.** Технологічний процес створення аміачної селітри за рахунок нейтралізації азотної кислоти газоподібним аміаком є складним багатопараметричним об'єктом управління. У першому наближенні такий процес описується системою двох нелінійних диференціальних рівнянь, що призводить до ускладнення побудови систем автоматичного регулювання. Встановлено, що процес нейтралізації супроводжується трьома фазовими реологічними переходами, котрі являють собою інтегральні імпульсні дельта-функції Дірака з ядром у вигляді нелінійних диференціальних рівнянь перенесення кількості маси і тепла. Розроблені математичні моделі процесу нейтралізації на основі теорії реологічних перетворень з використанням методу нульового градієнта.

#### Література

- Поркуян О. В. Реологічні моделі технологічного контролю параметрів з внутрішніми зв'язками у виробництві аміачної селітри / О. В. Поркуян, Й. І. Стенцель, О. І. Проказа // Збірник наукових праць «Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – 2010. – № 12. – С. 21-28.
- Нелінійні моделі багатопараметричних хімічних об'єктів керування з реологічними перетвореннями / Й. І. Стенцель, О. В. Поркуян, О. І. Проказа, О. В. Кузнецова. // Матеріали 6-ї Міжнародної науково-практичної конференції “Розвиток наукових досліджень-2010”, Полтава, 22 - 24 листопада 2010 р. – Полтава, 2010. – Т. 8. – С. 108- 110.
- Поркуян О. В. Дослідження математичної моделі апарату нейтралізації у виробництві аміачної селітри / О. В. Поркуян, Й. І. Стенцель, О. І. Проказа // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 5/6 (47). – С. 19-21.
- Стенцель Й. І. Дослідження вимірювального контролю технологічних параметрів при реологічних перетвореннях хімічних процесів / Й. І. Стенцель, О. В. Поркуян, О. І. Проказа // Збірник наукових праць «Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – 2011. – № 19. – С. 31-36.
- Стенцель Й. І. Основи теорії багатопараметричних об'єктів керування з реологічними переходами / Й. І. Стенцель, О. В. Поркуян, О. І. Проказа // Технологічні комплекси. – 2010. – № 2. – С. 46-51.
- Патент на корисну модель №62220, МПК F02C9/26. Спосіб керування багатопараметричними технологічними об'єктами / Й.І. Стенцель, О.В. Поркуян, О.І. Проказа; заявник та патентовласник Технологічний інститут СХУ ім. В.Даля (м. Северодонецьк). – №а 2010 13764 ; заявл. 19.11.2010 ; опубл. 25.08.2011, Бюл. № 16.
- Патент на корисну модель №73954, МПК F02C9/16. Спосіб управління процесом нейтралізації кислоти у виробництві аміачної селітри / Й. І. Стенцель, О. І. Проказа, О. В. Поркуян, К. А. Літвінов ; заявник та патентовласник Технологічний інститут СХУ ім. В.Даля (м. Северодонецьк). – №и 2012 04391 ; заявл. 09.04.2012 ; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19.
- Стенцель Й. І. Математичні моделі апарату нейтралізації за витратою аміачної селітри / Й. І. Стенцель, О. І. Проказа, О. В. Поркуян // Збірник наукових праць «Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – 2012. – № 41. – С. 24-33.
- Стенцель Й. І. Математичні моделі управління апаратом нейтралізації кислоти за температурою реакції у виробництві аміачної селітри / Й. І. Стенцель, О. І. Проказа, О. В. Поркуян // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2012. – № 15 (186), Ч. 2. – С. 114-122.
- Стенцель Й. І. Дослідження оптимальності процесу нейтралізації азотної кислоти аміаком за температурою в реакційній зоні / Й. І. Стенцель, О. І. Проказа, О. В. Поркуян // Матеріали 8-ї Міжнародної науково-практичної конференції “Розвиток наукових досліджень - 2012”, Полтава, 19-21 листопада 2012 р. – Полтава, 2010. – Т. 9. – С. 73-75.
- Stentsel I. Researche softhe system of neutralization process control intheproduction of ammonium nitrate onthebasis of rheologic altransitions principles / I. Stentsel, O. Porkuyan, E. Prokaza //An International journal on motorization, vechicle, operation, energy efficiency and mechanical engineering “ТЕКА Commission of motorization and Energetics in Agriculture”. – 2012. – Vol. 12, № 4. – P.274-278.
- Проказа О. І. Теоретичні основи управління апаратом нейтралізації азотної кислоти за температурною депресією у виробництві аміачної селітри / О. І. Проказа // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2013. – № 15 (194), Ч. 1 – С. 222-228.
- Перов В. Л. Управление химико-технологическими системами / В. Л. Перов, А. Ф.Егоров, А. Ю. Хабарин. – М.: МХТИ им. Д.И.Менделеева, 1981. – 52 с.
- Справочник азотчика: в т.2. / под общей редакцией Е.Я. Мельникова. – М.: Химия, 1987. – 464 с.
- Основы автоматизации и автоматизации химических производств / П. А. Обновленский, П.А. Коротков, А.Л. Гуревич, Б.В. Ильин. – М.-Л.: Химия, 1965. – 608 с.
- Производство аммиачной селитры в агрегатах большой единичной мощности / М. Е. Иванов, В. М. Олевский, Н. Н. Поляков и др. – М.: Химия, 1990. – 228 с.
- Направления модернизации производственного комплекса азотная кислота – аммиачная селитра / А. П. Митронов, А.П. Мудрый, А.Н. Кочерги, А.Г. Удовенко // Хімічна промисловість України - 2000. – № 1-2. – С. 30-34.
- Система управления технологическим процессом производства слабой азотной кислоты и аммиачной селитры в агрегатах АК-72М и АС-72М на ферганском ПО «Азот» / Ф.Т. Адылов, Н.Н. Турапина, В.В.



- Перекрестов, Н. Р. Юсупбеков // Промышленные контроллеры АСУ. – 2004. – № 4. – С.1-6.
19. Азотные удобрения. Пути производства аммиачной селитры улучшенного качества / Л. Н. Щегров, В. В. Манк, И. Н. Новиков, Н. М. Антрапцева // Хімічна промисловість України. – 2004. – № 6 (65). – С. 6.
  20. Миниович М. А. Производство аммиачной селитры / М. А. Миниович. – М.: Химия, 1974. – 239 с.
  21. Таганов И. Н. Моделирование процессов массо- и энергопереноса / И. Н. Таганов. – Л.: Химия, 1979. – 203 с.
  22. Стенцель Й. І. Математичне моделювання хімічних процесів на основі теорії реологічних переходів / Й. І. Стенцель // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: Науковий журнал. – Луганськ, 2007. – № 5 (111), Ч.2. – С. 91-96.
  23. Стенцель Й. І. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування / Й. І. Стенцель – К.: ІСДО, 1993. – 328 с.

### References

1. Porkujan O. V. Reologichni modeli tehnologichnogo kontrolju parametriv z vnutrishnimi zv'jazkami u virobnictvi amiachnoi selitri / O.V. Porkujan, J.I. Stencil', O. I. Prokaza // Zbirnik naukovih prac' «Visnik nacional'nogo tehnicnogo universitetu «Harkivskij politehnicnij institut». «Elektroenergetika ta peretvorjuval'na tehnika». – 2010. – № 12. – S. 21-28.
2. Nelinijni modeli bagatoparametricnih himicnih ob'ektiv keruvannja z reologichnimi peretvorennyami / J. I. Stencil', O. V. Porkujan, O. I. Prokaza, O. V. Kuznecova. // Materiali 6-ї Mizhnarodnoї naukovopraktichnoї konferencії “Rozvitok naukovih doslidzen'-2010”, Poltava, 22-24 listopada 2010 r. – Poltava, 2010. – T. 8. – S. 108-110.
3. Porkujan O.V. Doslidzhennja matematichnoї modeli aparatu nejtralizacії u virobnictvi amiachnoi selitri / O.V. Porkujan, J.I. Stencil', O.I. Prokaza // Shidno-Evropejs'kij zhurnal peredovih tehnologij. – 2010. – № 5/6 (47). – S. 19-21.
4. Stencil' J. I. Doslidzhennja vimirjuval'nogo kontrolju tehnologichnih parametriv pri reologichnih peretvorennyah himicnih procesiv / J.I. Stencil', O.V. Porkujan, O.I. Prokaza // Zbirnik naukovih prac' «Visnik nacional'nogo tehnicnogo universitetu «Harkivskij politehnicnij institut». «Elektroenergetika ta peretvorjuval'na tehnika». – 2011. – № 19. – S. 31-36.
5. Stencil' J. I. Osnovi teorii bagatoparametricnih ob'ektiv keruvannja z reologichnimi peredodami / J. I. Stencil', O. V. Porkujan, O.I. Prokaza // Tehnologichni kompleksy. – 2010. – № 2. – S. 46-51.
6. Patent na korisnu model' №62220, MPK F02C9/26. Sposib keruvannja bagatoparametricnimi tehnologichnimi ob'ektami / J.I. Stencil', O.V. Porkujan, O.I. Prokaza; zajavnik ta patentovlasnik Tehnologicnij institut SNU im. V. Dalja (m. Severodonec'k). – №a 2010 13764; zajavl. 19.11.2010; opubl. 25.08.2011, Bjul. № 16.
7. Patent na korisnu model' №73954, MPK F02C9/16. Sposib upravlinnja procesom nejtralizacії kisloti u virobnictvi amiachnoi selitri / J. I. Stencil', O. I. Prokaza, O. V. Porkujan, K. A. Litvinov; zajavnik ta patentovlasnik Tehnologicnij institut SNU im. V. Dalja (m. Severodonec'k). – №u 2012 04391; zajavl. 09.04.2012; opubl. 10.10.2012, Bjul. № 19.
8. Stencil' J. I. Matematichni modeli aparatu nejtralizacії za vitratuju amiachnoi selitri / J. I. Stencil', O. I. Prokaza, O. V. Porkujan // Zbirnik naukovih prac' «Visnik nacional'nogo tehnicnogo universitetu «Harkivskij politehnicnij institut». «Elektroenergetika ta peretvorjuval'na tehnika». – 2012. – № 41. – S. 24-33.
9. Stencil' J. I. Matematichni modeli upravlinnja aparatom nejtralizacії kisloti za temperaturoju reakcії u virobnictvi amiachnoi selitri / J.I. Stencil', O.I. Prokaza, O.V. Porkujan // Visnik Shidnoukraїns'kogo nacional'nogo universitetu im. Volodimira Dalja. – 2012. – № 15 (186), ch. 2. – S. 114-122.
10. Stencil' J. I. Doslidzhennja optimal'nosti procesu nejtralizacії azotnoi kisloti amiakom za temperaturoju v reakcijnij zoni / J. I. Stencil', O. I. Prokaza, O. V. Porkujan // Materiali 8-ї Mizhnarodnoї naukovopraktichnoї konferencії “Rozvitok naukovih doslidzen' - 2012”, Poltava, 19-21 listopada 2012 r. – Poltava, 2010 – T. 9. – S. 73-75.
11. Stentsel I. Researche softhe system of neutralization process control in the production of ammonium nitrate on the basis of rheologic al transitions principles / I. Stentsel, O. Porkujan, E. Prokaza // An International journal on motorization, vechicle, operation, energy efficiency and mechanical engineering “TEKA Commission of motorization and Energetics in Agriculture”. – 2012. – Vol. 12, № 4. – R.274-278.
12. Prokaza O.I. Teoretichni osnovi upravlinnja aparatom nejtralizacії azotnoi kisloti za temperaturoju depresiju u virobnictvi amiachnoi selitri / O.I. Prokaza // Visnik Shidnoukraїns'kogo nacional'nogo universitetu im. Volodimira Dalja. – 2013. – № 15 (194), Ch. 1 – S. 222-228.
13. Perov V.L. Upravlenie himiko-tehnologicheskimi sistemami / V.L. Perov, A.F. Egorov, A. Ju. Habarin. – M.: MHTI im. D.I. Mendeleeva, 1981. – 52 s.
14. Spravochnik azotchika: v t.2. / pod obshhej redakciej E. Ja. Mel'nikova. – M.: Himija, 1987. – 464 s.
15. Osnovy avtomatiki i avtomatizacії himicheskij proizvodstv / P.A. Obnovlenskij, P.A. Korotkov, A.L. Gurevich, B. V. Il'in. – M.-L.: Himija, 1965. – 608 s.
16. Proizvodstvo ammiachnoj selitry v agregatah bol'shoj edinichnoj moshhnosti / M.E. Ivanov, V.M. Olevskij, N.N. Poljakov i dr. – M.: Himija, 1990. – 228 s.
17. Napravlenija modernizacії proizvodstvennogo kompleksa azotnaja kislota – ammiachnaja selitra / A. P. Mitronov, A. P. Mudryj, A.N. Kocherghi, A.G. Udovenko // Himichna promislivist' Ukraїni – 2000. – № 1–2. – S. 30-34.
18. Sistema upravlenija tehnologicheskim processom proizvodstva slaboj azotnoj kisloty i ammiachnoj selitry v agregatah AK-72M i AS-72M na ferganskom PO «Azot» / F. T. Adylov, N. N. Turapina, V. V. Perekrestov, N. R. Jusupbekov // Promyshlennye kontrollery ASU. – 2004. – № 4. – S.1– 6.
19. Azotnye udobrenija. Puti proizvodstva ammiachnoj selitry uluchshennogo kachestva / L. N. Shhegrov, V. V. Mank, I. N. Novikov, N. M. Antrapceva // Himichna promislivist' Ukraїni. – 2004. – № 6 (65). – S. 6.
20. Miniovich M. A. Proizvodstvo ammiachnoj selitry / M. A. Miniovich. – M.: Himija, 1974. – 239 s.
21. Taganov I. N. Modelirovanie processov masso- i jenergooperenosa / I. N. Taganov. – L.: Himija, 1979. – 203 s.
22. Stencil' J.I. Matematichne modeljuvannja himicnih procesiv na osnovi teorii reologichnih perehodiv / J.I. Stencil' // Visnik Shidnoukraїns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja: Naukovij zhurnal. – Lugans'k, 2007. – № 5 (111), Ch.2. – S. 91-96.

23. Stencel' J.I. Matematichne modeljuvannja tehnologich-nih ob'ektiv keruvannja / J.I. Stencel' – K.: ISDO, 1993. – 328 s.

**Стенцель И. И., Поркуян О. В., Проказа Е. И.**  
**Реологические преобразования при управлении**  
**аппаратом нейтрализации в производстве аммиачной**  
**селитры**

*Показано, что в аппарате нейтрализации неконцентрированной азотной кислоты газообразным аммиаком имеют место реологические преобразования массы реагирующих веществ, тепловой энергии и количества движения, которые обуславливают эффективность работы аппарата. Приведены физические модели и графики необратимых реологических переходов и показано, что такие переходы имеют ступенчатый вид и описываются интегральными импульсными дельта-функциями Дирака. Получены математические модели аппарата нейтрализации по концентрации раствора аммиачной селитры и температуре в реакционном стакане.*

**Ключевые слова:** *нейтрализация, кислота, аммиак, селитра, реология, превращение, переход, функция, модель, масса, температура, реакция.*

**Stencel J. I., Porkuyan O. V., Prokaza O. I.**  
**Rheological transformations in the control of**  
**neutralization apparatus in the production of ammonium**  
**nitrate**

*It is shown that rheological mass conversions of reactants, thermal energy and momentum take place in the*

*neutralization apparatus of dilute nitric acid with gaseous ammonia determining the efficiency of the apparatus. The physical models and graphs irreversible rheological transitions are given and it's shown that such transitions have a stair-step view and is described by the integral impulse Dirac delta function. The mathematical models of neutralization apparatus by the solution concentration of ammonium nitrate and the temperature in the reaction beaker are obtained.*

**Keywords:** *neutralization, acid, ammonia, nitrate, rheology, transformation, transition, function, model, mass, temperature, reaction.*

**Стенцель Йосип Іванович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Технологічний інститут Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) [kafedraKISU@gmail.com](mailto:kafedraKISU@gmail.com)

**Поркуян Ольга Вікторівна** – д.т.н., професор, директор, Технологічний інститут Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) [OLGA.PORKUIAN@gmail.com](mailto:OLGA.PORKUIAN@gmail.com)

**Проказа Олена Іванівна** – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Технологічний інститут Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) [kafKISU.Elena@gmail.com](mailto:kafKISU.Elena@gmail.com)

*Рецензент:* **Суворін О. В.** - д.т.н., доцент

Стаття подана 10.10.2014