

УДК 532.135.66.012

Проказа О.І.

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В РЕАКЦІЙНІЙ СКЛЯНЦІ АПАРАТУ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ

Проказа О.І. Математичні моделі термодинамічних процесів в реакційній склянці апарату нейтралізації аміачної селітри. Експериментальними дослідженнями встановлено, що температура у реакційній склянці апарату нейтралізації за її висотою змінюється нерівномірно. Для теоретичного дослідження термодинамічного режиму процесу нейтралізації використано принцип реологічних перетворень та методу нульового градієнта. Розроблені аналітичні моделі термодинамічних процесів. Показані причини зміни термодинамічного поля за висотою реакційної склянки.

Ключові слова: кислота, селітра, температура, швидкість, реакція, склянка, витрата, реологія, енергія.

Проказа Е.И. Математические модели термодинамических процессов в реакционном стакане аппарата нейтрализации аммиачной селитры. Экспериментальными исследованиями установлено, что температура в реакционном стакане аппарата нейтрализации за ее высотой изменяется неравномерно. Для теоретического исследования термодинамического режима процесса нейтрализации использован принцип реологических преобразований и метода нулевого градиента. Разработаны аналитические модели термодинамических процессов. Показаны причины изменения термодинамического поля по высоте реакционного стакана.

Ключевые слова: кислота, селитра, температура, скорость, реакция, стакан, расход, реология, энергия.

Prokaza O.I. The mathematical models of thermodynamic processes in the reaction glass of the neutralization apparatus of ammonium nitrate. Experimental studies established that the reaction temperature in a glass apparatus for neutralizing its height varies irregularly. For the theoretical study of thermodynamic regime neutralization process uses the principle of rheological changes and zero gradient method. Analytical models of thermodynamic processes are developed. It is shown the reasons thermodynamic field height glass reaction.

Keywords: acid, nitrate, temperature, speed, reaction, glass, consumption, rheology, energy.

Вступ. Виробництво аміачної селітри (АС) відрізняється значним енерго- та ресурсоспоживанням, що призводить до високої вартості готової продукції, викидів шкідливих речовин в атмосферу. На сучасних виробництвах АС конденсат сокової пари, як побічний продукт виробництва, використовується в невеликих кількостях для охолодження апарату нейтралізації (далі ВТН) тільки в тих випадках, коли температура реакційної маси досягає гранично допустимого значення. Перевищення температури в реакційній зоні склянки ВТН над температурою розчину АС на виході з нього на 10°C від номінальної приводить до різкого зростання викидів шкідливих речовин в атмосферу і створює пожежо- і вибухонебезпечну ситуацію на виробництві. На сучасних виробництвах АС процес нейтралізації азотної кислоти (АК) газоподібним аміаком (ГПА), як правило, ведуть за концентрацією йонів водню в реакційній зоні та в розчині АС на виході з ВТН за допомогою *pH*-метрів. За їх різницею змінюється витрата АК, яка подається в барботерну систему апарату ВТН. Такий спосіб керування технологічним процесом є недосконалим, так як, по-перше, температура реакційної маси на протязі деякого часу може підвищуватися за рахунок запізнення зміни витрати неконцентрованої азотної кислоти (НАК), по-друге, такий спосіб не дозволяє контролювати безпосередньо температуру, як основний впливовий фактор, і, по-третє, надійність і точність керування є достатньо низькими. Так як виробництва АС є пріоритетними не тільки з точки зору виготовлення мінерального добрива, але й як стратегічна сировина для багатьох галузей хімічних виробництв, тому задача підвищення його ефективності за рахунок зменшення енерго- і ресурсозбереження є актуальною задачею. Враховуючи той факт, що НАК й аміак виготовляються іншими виробництвами азотного комплексу, основна задача щодо підвищення ефективності виробництва АС може бути вирішена за рахунок вдосконалення існуючих і розробки нових систем автоматизованого контролю та керування.

Аналіз останніх досліджень та літератури. Сучасні агрегати виробництва АС мають низку специфічних особливостей, які потрібно враховувати при розробці систем автоматизації [1]. Велика потужність і послідовна структура схеми виробництва АС задають підвищені вимоги щодо надійності контролю, регулювання та захисту, оскільки вихід з ладу окремого елемента часто приводить до повної зупинки ВТН і, як наслідок, до великих економічних втрат. Організація управління об'єктами такого типу вимагає перегляду традиційних схем керування та нового -

системотехнічного підходу до розробки систем вимірювального контролю (ВК), автоматичного регулювання та автоматизованих систем управління.

Існуючі системи автоматизації виробництва АС побудовані за принципом стабілізації технологічних параметрів, що визначають режим процесу згідно з технологічним регламентом, але не дозволяють отримувати результати, які гарантують оптимальну його роботу. Для автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП) характерна наявність обчислювальної підсистеми, що забезпечує математичну й логічну обробку інформації за заданими алгоритмами, розробку та видачу керуючих дій на регулятори або безпосередньо на виконавчі механізми. На неї повністю або частково переносяться функції інформаційної підсистеми, а також функція контролю роботи протиаварійного захисту (ПАЗ) [2]. У роботі [3] розглянуті можливі напрямки маловитратної модернізації агрегату аміачної селітри. Відмінність техніко-економічних показників (ТЕП) виробництва АС залежно від особливості конкретних технологічних схем знаходиться, головним чином, в області витрати енергоресурсів, які залежать від концентрації використовуваної НАК та утилізації тепла нейтралізації. Аналіз багатотоннажних агрегатів отримання азотної кислоти АК-72М та аміачної селітри АС-72М, з точки зору їх керування проведений на Ферганському азотному комплексі «Азот» [4] дозволив виділити низку істотних особливостей, а саме: кожен з об'єктів є послідовною структурою виробництва кінцевого продукту, в якій технологічні лінії та вузли агрегатів знаходяться в тісному технологічному й інформаційному взаємозв'язку. У роботі [5] запропоновані нові хіміко-технологічні рішення виробництва аміачної селітри, що дозволяють отримувати добрива вищої якості і поліпшити екологічні умови виробництва.

Системи автоматичного регулювання (САР) призначені для автоматичної стабілізації окремих параметрів технологічного процесу, як: співвідношенням між витратами НАК і ГПА, температурою нейтралізації в склянці ВТН і концентрацією азотної кислоти в плаві АС. В основу САР покладено принцип одноконтурних систем регулювання. На діючих підприємствах виробництва аміачної селітри здійснюється за рахунок нейтралізації 56-62%-ої азотної кислоти. Використання більш концентрованої азотної кислоти, з однієї сторони, стримується проблемою її отримання, а з іншої - підвищенням температури у ВТН вище 180°C, що може привести до термічного розкладання селітри [6]. У результаті реакції нейтралізації в промислових агрегатах аміачної селітри виділяється 144936 Дж/моль (34624 кал/моль) тепла (з врахуванням технологічних втрат). Цього тепла достатньо для отримання розчину АС концентрацією вищою 86%.

Відомий спосіб автоматичного керування процесом нейтралізації НАК у виробництві аміачної селітри [7] шляхом регулювання її подачі в залежності від потенціалу платинового електроду відносно стандартного, причому платиновий електрод знаходиться в електролітичній комірці. Стандартний електрод розташований у посудині з еталонним розчином. Посудина з еталонним розчином розташована в тій самій електрохімічній комірці, яка знаходиться на виході апарату нейтралізації. Через вимірювальну комірку протікає розчин аміачної селітри. Різниця потенціалів вимірювального платинового і стандартного електроду змінює витрату НАК в апарат ВТН до тих пір, поки кислотність розчину АС не буде дорівнювати кислотності еталонного розчину. Недоліком цього способу є те, що вимірювання кислотності здійснюється тільки на виході розчину АС з реакційної склянки. Удосконалений спосіб автоматичного керування процесом нейтралізації кислоти, в якому керуюча дія на подачу НАК обумовлюється сигналом платинового електроду з реакційної зони апарату, за рахунок чого досягається збільшення точності управління процесом, виключення збоїв у роботі, забезпечення можливості автоматичного пуску виробництва, зниження втрат та викидів в оточуюче середовище кислоти і аміаку, описаний в [8]. Таким чином, з аналізу сучасних способів автоматичного керування процесом виробництва АС випливає, що відомі принципи керування не забезпечують відповідної точності, надійності та оптимальності.

Метою статті є дослідження термодинамічного поля склянки апарату ВТН для оцінки можливості використання більш ефективних і точних методів управління таким процесом.

Постановка проблеми. Як показано в [9, 10], існуючі способи, як правило, направлені на стабілізацію окремих технологічних параметрів, до яких відносять регулювання співвідношення витрат НАК і ГПА з метою забезпечення матеріального та стехіометричного балансу реакції за рахунок зміни витрати НАК і стабілізацію концентрації АК в розчині АС на виході з реакційної склянки апарату ВТН за рахунок зміни витрати рідкого аміаку. Причому концентрацію АК в

розчині АС вимірюють посереднім потенціометричним методом за концентрацією водню в цьому розчині без врахування того, що водневий показник, який визначається платиновими електродами не є достовірним, так як розчин у реакційній зоні ще знаходиться в зоні реологічного переходу, у котрому має місце сукупність непрореагованої АК, ГПА, аміачної селітри та інших складових, що достатньо сильно впливає на показання рН-метрів. У науково-технічній літературі практично не приводяться результати досліджень термодинамічного режиму роботи апарату нейтралізації. Вказується, що температура в зоні реакції не повинна перевищувати 165 °С, розчину АС на виході з реакційної склянки знаходиться в діапазоні від 150 до 160 °С. Не розглядаються питання залежності температури в реакційній зоні як за лінійною так і за часовою координатами. Апарат ВТН відноситься до багатопараметричних об'єктів управління, який формально має чотири вихідних регульованих координати, як: концентрація Q_{AC} аміачної селітри в розчині, температура T_P реакції, тиск P_C сокової пари та рівень і трьома регулюючими координатами, як: витрати НАК F_{AK} , ГПА F_A , конденсату сокової пари F_K та сокової пари F_C . Між технологічними параметрами мають місце перехресні зв'язки. У науковій літературі відсутні дослідження процесу нейтралізації азотної кислоти як багатопараметричного об'єкта керування.

Як показано у [11, 12] технологічні процеси в хімічній технології супроводжуються реологічними перетвореннями, в основі яких є перенесення кількості маси, енергії та руху. Наявність того чи іншого реологічного переходу призводить до зміни сталих часу перехідних процесів, а відповідно до появи як динамічних так і статичних похибок вимірювального контролю управління. Особливо це стосується оптимального управління процесу нейтралізації АК. Тому визначення точності вимірювального контролю при керуванні хіміко-технологічним процесом нейтралізації НАК ГПА є важливою науковою задачею.

Матеріали досліджень. Згідно з фізичною моделлю реологічного перетворення НАК та ГПА у плав аміачної селітри з врахуванням процесу реакції [13] перенесення маси цих матеріальних потоків через зону реологічного перетворення (ЗРП) описується наступним нелінійним диференціальним рівнянням

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} + D_T \nabla^2 T + v_i \nabla T = F_{\Pi} \frac{d^3 T}{dx^3} + a \frac{d^2 T}{dx^2} + v_{AC} \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

де T - температура плавів АС, яка створюється в реакційній зоні склянки за час θ ; D_T – коефіцієнт термодифузії; v_i – конвекційна складова швидкості теплового потоку; ∇^2 – лапласіан; ∇ – оператор Лапласа; F_{Π} – об'ємна витрата плавів АС; $\alpha = \lambda / c_p \rho$ – температуропровідність плавів; λ, c_p, ρ – теплопровідність, теплоємність і густина плавів відповідно; v_{AC} – швидкість переміщення плавів в реакційній склянці.

Для спрощення досліджень приймемо, що рух реакційної маси за висотою x реакційної склянки є одностороннім і рівномірним. Тоді рівняння (1) спрощується і приводиться до наступної форми

$$\frac{\partial T(y, \theta)}{\partial \theta} + D_T \frac{\partial T(y, \theta)}{\partial y^2} + v_i \frac{\partial T(y, \theta)}{\partial y} = F_{\Pi} \frac{d^3 T(x)}{dx^3} + a \frac{d^2 T(x)}{dx^2} + v_{AC} \frac{dT(x)}{dx}, \quad (2)$$

де y – лінійна координата зони джерела теплової енергії (реакційна зона).

Так як фізико-хімічний процес, який описується рівнянням (2), протікає в ЗРП (у реакційній склянці апарату ВТН), то його можна описати такою інтегральною імпульсною дельта-функцією Дірака

$$\int_{\theta=0}^t f(\xi) \delta(\xi - \theta_0) d\xi = \begin{cases} 0 & t_0 < t_1, t_0 \geq t_2; \\ f(t+0) & t_1 < t_0 < t_2, \end{cases}, \quad (3)$$

де $f(\xi)$ – функція перетворення; ξ – деяка змінна, залежна від часу θ ; $\delta(\xi - \theta_0)$ – ядро інтегральної імпульсної дельта-функції Дірака; $f(t_0 + 0)$ – функція стоку аміачної селітри; t_0 – номінальне значення часу стоку АС; t_1, t_2 – допустимі межі зміни часу стоку АС.

У нашому випадку функцією перетворення буде залежність $T(x) = fT(y, \theta)$, а ядром функції (3) буде варіація цієї функції, а фактично її інтегральний функціонал. Згідно з методом

нульового градієнта [14] нелінійне диференціальне рівняння (2) розкладається на наступну систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial T(y, \theta)}{\partial \theta} + D_T \frac{\partial^2 T(y, \theta)}{\partial y^2} + v_i \frac{\partial T(y, \theta)}{\partial y} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{F_{\Pi}}{v_{AC}} \frac{d^2 T(x)}{dx^2} + \frac{a}{v_{AC}} \frac{dT(x)}{dx} + T(x) = T(y, \theta). \quad (5)$$

Для аналітичного розв'язку рівняння (4) потрібно обґрунтувати початкові та кінцеві умови. Якщо припустити, що швидкість конвекційної складової незначна і нею можна знехтувати, то рівняння (4) приводиться до вигляду:

$$\frac{\partial T(y, \theta)}{\partial \theta} + D_T \frac{\partial^2 T(y, \theta)}{\partial y^2} = 0, \quad (6)$$

рішенням якого при нульових початкових умовах буде:

$$T(y, \theta) = T_0 \operatorname{erfc}(y/2\sqrt{D_T \theta}). \quad (7)$$

Якщо швидкістю конвекційної складової знехтувати не можна, а $y = v_i \theta$ є лінійною функцією, то рівняння (4) приймає вигляд

$$\frac{D_T}{2v_i^2} \frac{\partial T(y, \theta)}{\partial \theta} + T(y, \theta) = T_0, \quad (8)$$

де T_0 – номінальна температура в ЗРП.

Розв'язком рівняння (8) при нульових початкових умовах буде:

$$T(y, \theta) = T_0 [1 - \exp(-2\theta v_i^2 / D_T)]. \quad (9)$$

Рівняння (5) описує розподілення термодинамічного поля вздовж висоти x реакційної склянки, а фактично від місця уведення реагуючих компонентів до стоку реакційної маси з апарату ВТН. Приймаючи до уваги нульові початкові умови, рішенням цього рівняння буде:

$$T(x) = T(\theta, y) \{1 - \exp(-\beta x) [\cos(\psi x) + (\beta/\psi) \sin(\psi x)]\}, \quad (10)$$

де $\beta = -a/2F_{\Pi}$; $\psi = \sqrt{v_{AC}/2F_{\Pi}} \sqrt{1 - (a\beta/v_{AC})}$.

Підставивши рівняння (7) або (9) у (10), отримуємо математичні моделі процесу перенесення теплової енергії в ЗРП склянки апарату ВТН в аналітичній формі. Для процесу, коли можна знехтувати швидкістю конвекційного потоку:

$$T(x, v_i = 0) = T_0 \operatorname{erfc}(y/2\sqrt{D_T \theta}) \{1 - \exp(-\beta x) [\cos(\psi x) + (\beta/\psi) \sin(\psi x)]\}. \quad (11)$$

Якщо швидкість розповсюдження тепла в ЗРП є лінійною, то маємо:

$$T(x) = T_0 [1 - \exp(-2\theta v_i^2 / D_T)] \{1 - \exp(-\beta x) [\cos(\psi x) + (\beta/\psi) \sin(\psi x)]\}. \quad (12)$$

Експериментальними дослідженнями встановлено, що розподілення температури реакційної маси в ЗРП апарату ВТН від системи уведення реагентів (барботерної системи) до виходу плаву зі склянки є нерівномірним як показано на рис. 1.

Згідно з технологічним регламентом допустимий діапазон зміни температури плаву АС може змінюватися від $T_1=150^{\circ}\text{C}$ до $T_3=165^{\circ}\text{C}$. При температурі $T < T_1$ появляється ймовірність кристалізації плаву та зменшення його концентрації, а при $T > T_3$ плав може бути вибухонебезпечним. Як правило, стабілізацію температури плаву АС виконують шляхом уведення в склянку охолодженого конденсату сокової пари (КСП).

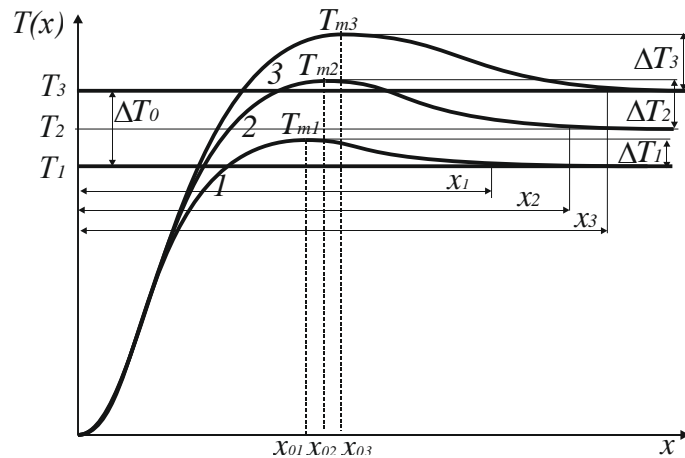


Рис. 1. Експериментальні криві розподілення температури плаву в ЗРП за висотою склянки

З рисунка видно, що у допустимому діапазоні ΔT_0 максимум температури в склянці знаходиться на достатньо вузькій лінійній ділянці – від x_{01} до x_{03} . У той же час різниця температур $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ збільшується зі збільшенням температури T_1, T_2, T_3 відповідно.

Результати досліджень. Аналіз теоретичних та експериментальних досліджень показує, що зміна усталеного значення температури плаву АС ΔT_i визначається сумарною швидкістю матеріальних потоків, котрі уводяться в реакційну склянку. Якщо в реакційну зону склянки вводиться КСП, котрий рівномірно розподіляється за рахунок зустрічного руху потоків, то рівняння (11) і (12) приймають наступну форму:

$$T(x, v_i = 0) = T_0 \operatorname{erfc} \left(v_k \sqrt{\frac{\theta}{4D_T}} \right) \{1 - \exp(-\beta x) [\cos(\psi x) + (\beta/\psi) \sin(\psi x)]\}; \quad (13)$$

$$T(x) = T_0 [1 - \exp(-2\theta(v_i + v_k)^2/D_T)] \{1 - \exp(-\beta x) [\cos(\psi x) + (\beta/\psi) \sin(\psi x)]\}, \quad (14)$$

де v_k – лінійна швидкість уведення КСП в реакційну зону склянки.

Позначивши у рівнянні (5) $\zeta = F_{\Pi} / v_{AC}$ і $\sigma = a / v_{AC}$, знаходимо наступне відношення: $\phi = a / \sqrt{(v_{AC}) F_{\Pi}}$. Якщо $\phi \geq 2$, то функція $T(x) = f(x)$ буде монотонно зростаючою до деякого максимального значення температури, котре дорівнюватиме максимальній температурі в реакційній зоні (температури в точках x_{01}, x_{02}, x_{03}). Якщо в реакційну зону вводиться КСП з витратою $F_k = \text{const}$ і температурою T_k , то параметр ϕ зменшиться на величину $k = T_m / T_k$, де T_m – максимальна температура плаву АС в склянці; T_k – температура КСП, цей параметр стає меншим 2 і розподілення за висотою склянки стає таким, як показано на рис. 1. Експериментальні дослідження показують, що значення максимальної температури T_m , в основному, залежить від двох факторів: масової витрати НАК і ГПА, які подаються в барботерну систему, і зміни концентрації азотної кислоти, яка може змінюватися від 56 до 65%. Практично КСП є тим динамічним елементом системи управління процесом нейтралізації АК, який забезпечує необхідний термодинамічний режим роботи апарату ВТН. Як вказувалося вище, забезпечення оптимального режиму роботи агрегату виконують за рахунок вимірювального контролю кислотності в зоні максимальної температури T_m і в плаві АС на виході з апарату ВТН. Як показали експериментальні дослідження роботи апарату ВТН, стабілізація режиму роботи апарату ВТН на рівні мінімальної робочої температури T_1 (див. рис. 1) приводить до зменшення активної робочої висоти реакційної склянки до x_1 , а значить до зменшення продуктивності роботи апарату ВТН, а відповідно, - до виробництва АС в цілому. При роботі апарату ВТН на максимальній температурі T_3 продуктивність апарату є високою, але виникає висока ймовірність появи небезпечних ситуацій з однієї сторони та викидів пари азотної кислоти в сокову пару – з іншої.

Тому найбільш оптимальним є режим, для якого зміна термодинамічного поля показана на рис. 1, крива 2. Окрім того, експериментальні дослідження показали, що при уведенні в апарат ВТН КСП перепад температур $\Delta T_j = T_{mj} - T_j$, де $j=1, 2, 3$, залежить від значення максимальних температур T_{mj} .

Висновки. Приведені вище теоретичні та експериментальні дослідження реологічних перетворень, які мають місце в ЗРП реакційної склянки апарату ВТН показують, що на технологічний процес нейтралізації азотної кислоти суттєвий вплив чинить термодинамічний режим, який є наслідком екзотермічної реакції неконцентрованої азотної кислоти та газоподібного аміаку. Показано, що розподілення температурного поля за висотою реакційної склянки апарату ВТН є нелінійним. Максимум температури наступає в зоні реологічного переходу та обумовлений уведенням конденсату сокової пари. За рахунок цього температура плаву на виході з апарату ВТН зменшується на величину ΔT . Так як різниця температур ΔT є практично лінійною функцією від витрати F_k конденсату сокової пари, то її можна використати для управління температурним режимом за допомогою стандартних термодатчиків замість потенціометричного методу на основі дорогих платинових електродів, які використовуються на виробництвах АС. Так як на зміну температурного режиму в апараті ВТН впливає як витрата КСП, так і його температура, то для підвищення точності стабілізації температури плаву на виході з апарату рекомендується стабілізувати останню за каскадним принципом.

1. Иванов М. Е. Производство аммиачной селитры в агрегатах большой единичной мощности / М. Е. Иванов, В. М. Олевский, Н. Н. Поляков и др. – М.: Химия, 1990. – 228 с.
2. Азизов А. М. Информационные системы контроля параметров технологических процессов / А. М. Азизов. – Л.: Химия, 1983. – 328 с.
3. Митронов А. П. Направления модернизации производственного комплекса азотная кислота – аммиачная селитра / А. П. Митронов, А. П. Мудрый, А. Н. Кочергин // Хімічна промисловість України. – 2000. – №1-2. – С. 30-34.
4. Адылов Ф. Т. 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 // Промышленные контроллеры АСУ. – 2004. – №4. – С. 1-6.
5. Щегров Л. Н. Азотные удобрения. Пути производства аммиачной селитры улучшенного качества / Л. Н. Щегров, В. В. Манк, И. Н. Новиков // Хімічна промисловість України. – 2004. – №6(65). – С. 6.
6. Правила безопасности для неорганических производств азотной промышленности (ПБНП-74). – М.: Недра, 1978. – 37 с.
7. Миниович М. А. Производство аммиачной селитры / М. А. Миниович. – М.: Химия, 1974. – 239 с.
8. Пат. 43404 Україна, С01N27/48. Спосіб автоматичного управління процесом нейтралізації кислоти у виробництві аміачної селітри в апараті використання тепла нейтралізації / Анохін А. О., Белік С. В., Довгалов Л. Ю., Циглевський П. М., Чистоклетов М. В.; заявник та патентовласник Державний науково-дослідний і проектний інститут хімічних технологій – №97115422; заявл. 12.11.1997; опубл. 17.12.2001, Бюл.№11.
9. Stentsel I. Researches of the system of neutralization process control in the production of ammonium nitrate on the basis of rheological transitions principles / I. Stentsel, O. Prokaza, 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.
10. Проказа О. І. Теоретичні основи управління апаратом нейтралізації азотної кислоти за температурною депресією у виробництві аміачної селітри / О. І.Проказа // Науковий журнал «Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля». – 2013. – №15(194). – Ч. 1 – С. 222-228.
11. 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 // Науковий журнал «Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля». – 2012. – №15(186). – Ч. 2. – С. 114-122.
12. 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. – Т. 9. – С. 73-75.
13. Проказа О. І. Автоматизоване керування процесом нейтралізації у виробництві аміачної селітри за принципами реологічних переходів / Дис. на здобуття канд. техн. наук. – Луганськ, 2014. – 171 с.
14. Стенцель Й. І. Фотоколориметричні газоаналізатори: Монографія / Й. І. Стенцель – К.: НМК ВО, 1992. – 120 с.