

Показано наукові пошуки в галузі кінетики хімічних процесів наукової школи академіка В.І. Атрощенко та досягнення при впровадженні результатів дослідження в промислове виробництво. Наведено аналіз наукових праць учених при дослідженні гетерогенно-каталітичних процесів під тиском в галузі технології зв'язаного азоту в 60-80-і роки ХХ століття.

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ГЕТЕРОГЕННО-КАТАЛІТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ТИСКОМ У ТЕХНОЛОГІЇ ЗВ'ЯЗАНОГО АЗОТУ НАУКОВОЇ ШКОЛИ В.І. АТРОЩЕНКА

Г.І. Гринь*

Доктор технических наук, профессор, проректор по научно-педагогической работе
Контактный телефон: 8 (057) 700-01-35.
E-mail: gryng@kpi.kharkov.ua

В.В. Казаков

Кандидат технических наук, председатель Правления ЗАО «Северодонецкое объединение Азот», ул. Пивоварова, 1, г. Северодонецк, Украина.

П.В. Кузнецов*

Кандидат технических наук, доцент кафедры экономической кибернетики и маркетингового менеджмента

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002.

1. Вступ

Головними напрямками досліджень наукової школи В.І. Атрощенко є вивчення кінетики хімічних процесів, у тому числі гетерогенно-каталітичних, абсорбційних процесів, які відбуваються під тиском, у технології зв'язаного азоту, вирішення теоретичних основ у технології неорганічних речовин і промислового каталізу, дослідження екологічних проблем у хімічній технології. Такі дослідження дозволяють зробити вагомий внесок у теоретичні основи хімічної технології, розробляти, проектувати й упроваджувати нові технології в промислове виробництво, і вирішувати проблеми одержання нових хімічних сполук і речовин.

Хімічна кінетика є складовою частиною теоретичних основ хімічної технології, основою для розробки й проектування нових систем одержання хімічних продуктів. Знання кінетики хімічних процесів допомагає знайти оптимальний технологічний режим, моделювати процес, розробити технологічні схеми виробництва і конструкції реакторів.

Дослідження гетерогенно-каталітичних процесів під тиском зв'язано з технологією одержання водню,

суміші азоту й водню, синтез-газу, метанолу, оксиду азоту й сірчаного ангідриду. Разом із В.І. Атрощенко ці пошуки виконували співробітники кафедри технології неорганічних речовин ХПІ та інших організацій: Г.Л. Звягінцев, О.Я. Лобойко, В.Є. Леонов, М.М. Караваєв, І.О. Слабун, М.О. Гавря, А.С. Савенков, В.С. Бесков, М.Ф. Клещов, А.П. Засорін, М.Т. Івахненко, Є.Г. Седашова, В.І. Тошинський, А.Н. Цейтлін, Б.А. Жидков, Є.І. Перлов та ін. [1–7].

Метою дослідження є узагальнення та вивчення наукових пошуків відомих Харківських учених в галузі технології зв'язаного азоту в 60-80-і роки ХХ століття.

2. Основна частина дослідження

Кінетика окиснення NH_3 на платиновому каталізаторі почалась вивчатись ще в 30-і роки ХХ ст. І.Є. Ададуровим разом із В.І. Атрощенко [8, 9]. Цьому процесу вчені приділяли значну увагу, тому що він є основним процесом у технології HNO_3 , оскільки в залежності від умов процесу, окрім цільового NO , можливо одержати N_2O та N_2 [1,2]. Високий вихід NO

залежить від температури, співвідношення $O_2:NH_3$, тиску, часу контактування, каталізаторів та ін. В.І. Атрощенко разом із співробітниками провів широкі наукові пошуки з кінетики окиснення NH_3 до NO як при атмосферному, так і високому тисках [10 – 12].

У роботах В.І. Атрощенко разом з Є.Г. Седашовою [13, 14] досліджено кінетику процесу окиснення NH_3 на платиновому каталізаторі повітрям, збагаченого киснем, і з'ясовано, що є можливість одержати високий вихід NO , збільшуючи вміст NH_3 у початковій суміші при збереженні співвідношення $O_2:NH_3=2,0\pm 1,7$. Авторами вперше встановлена основна стадія механізму – взаємодія NH_3 з оксидним шаром каталізатора. Показана можливість збільшення об'ємної концентрації NH_3 до 10,5–11,5 % при використанні повітря й до 12,5–13,0 % – повітря, збагаченого киснем. При цьому процес відбувається в оптимальному режимі автотермічно, спрощується технологічна схема, і підвищується швидкість абсорбції оксидів азоту при одержанні HNO_3 . У 40-і роки ХХ ст. ці дослідження були впроваджені в промислове виробництво з використанням відходів електролітичного кисню й одержано значний економічний і технологічний ефект [14].

У 60-і роки ХХ ст. В.І. Атрощенко разом з А.П. Засоріним були продовжені дослідження кінетики контактного окиснення NH_3 під тиском на платинових каталізаторах та в платинових трубках [11,15,16]. Установлено, що для зменшення часу контактування аміачно-повітряної суміші в реакторі при високій температурі процесу необхідно збільшувати кількість каталізатора пропорційно підвищенню тиску газу. Використання для процесу окиснення NH_3 повітря з високою концентрацією кисню або чистого кисню дозволяє досягти високих температур процесу без попереднього підігріву початкової суміші. Це дозволяє підтримувати необхідний режим окиснення NH_3 під тиском і при високій температурі процесу [15, 16].

Необхідність підвищення потужності агрегатів виробництва HNO_3 вимагало проведення досліджень кінетики контактного окиснення NH_3 при високих тисках і температурах. В.І. Атрощенко, А.С. Савенков та А.П. Засорін у роботах [10–12, 17], які проведено під тиском 0,5–3,0 МПа і температурі 850–1050 °С, установили співвідношення між тиском, температурою та кількістю каталізаторних сіток; знайшли константи швидкості, вивели рівняння кінетики. Авторами з'ясовано, що процес окиснення NH_3 на платиновому каталізаторі протікає в зовнішньо дифузійній області. Ці результати дослідження впроваджені в промислове виробництво при створенні нових потужних агрегатів виробництва HNO_3 – УКЛ та АК–72.

Необхідно відзначити, що всі дослідження, котрі проводились В.І.Атрощенко зі співробітниками ХПІ, виконувались вперше не тільки на Україні, а й у Радянському Союзі й у світі. Також уперше вивчався процес окиснення NH_3 із використанням методу вторинної іоно-іонної емісії разом зі співробітниками фізико-технічного інституту АН УРСР під керівництвом проф. Фогеля Я.М. На теренах Радянського Союзу було дві таких установки, але тільки в ХПІ була можливість досліджувати механізми складних хімічних процесів. За допомогою цього методу вивчали гетерогенно-каталітичні реакції, одержували дані про механізм процесів, які відбуваються під час іонізації

NH_3-O_2 суміші в газовому об'ємі й на поверхні каталізатора. У кінці 60-х – на початку 70-х рр. ХХ ст. авторами В.І. Атрощенко, Я.М. Фогелем, І.Є.Коробчанською, О.О. Сахаровим та ін. [18] при дослідженні та аналізі мас-спектрів встановлено присутність таких іонів: H_2^+ , H^+ , N_2^+ , N^+ , NO^+ , NH^+ , O_2^+ , O_2^- , O^+ , H_2O^+ , що дозволило з'ясувати склад проміжних сполук при окисненні NH_3 на платиновому каталізаторі.

В.І. Атрощенко разом з А.С. Савенковим, В.С. Бесковим у роботі [19] приведено результати дослідження процесу окиснення NH_3 у реакторі проточного типу під тиском при високих температурах. Вивчення кінетики процесу проводили в умовах, які дозволяли моделювати промислове виробництво. Установлено, що максимальний вихід NO при тискові 0,45 МПа, температурі 850 °С та співвідношенні $O_2:NH_3=1,8\pm 1,9$ сягає 95,4–96,1% і оптимальний час контактування дорівнює $1,62\cdot 10^{-4}$ с. З'ясовано, що підвищення тиску знижує вихід NO , а оптимальний час контактування газу з поверхнею каталізатора збільшується тим більше, чим нижче температура процесу. Автори показали, що при тиску 1,0–1,5 МПа для забезпечення високого виходу NO , необхідно здійснювати процес при 920–950 °С [19]. Авторами досліджено вплив відношення O_2 до NH_3 у процесі окиснення NH_3 на платиновому каталізаторі й показано, що при співвідношенні $O_2:NH_3=0,32$ утворюється N_2 і H_2 ; при $O_2:NH_3=0,75$ – азот і при $O_2:NH_3\geq 1,25$ – в основному NO . Установлено, що оптимальне відношення O_2 до NH_3 складає $1,7\pm 2,0$. Подальше підвищення співвідношення до $O_2:NH_3=3,0$ майже не збільшує вихід NO [19].

У роботі [5] авторами показано, що максимальні втрати NH_3 у вигляді N_2O можуть бути при проведенні процесу окиснення NH_3 при високих тисках, низьких лінійних швидкостях і високих температурах протікання реакції.

За результатами досліджень було виведено рівняння, що описує кінетику окиснення NH_3 до NO під тиском на платиновому каталізаторі [17]:

$$\frac{dP_{NO}}{d\tau} = K \frac{P_{NH_3} - P_{NH_3, \text{гран.}}}{P_{NO}}, \quad (1)$$

де P_{NH_3} – загальний парціальний тиск NH_3 у суміші;
 $P_{NH_3, \text{гран.}}$ – парціальний тиск NH_3 , який зв'язаний з перетворенням NH_3 в N_2O і N_2 ;
 P_{NO} – парціальний тиск NO .

Інтегрована форма рівняння має вигляд:

$$K = \frac{1}{\tau} (\alpha_{\text{гран.}} \ln \frac{\alpha_{\text{гран.}}}{\alpha_{\text{гран.}} - \alpha}), \quad (2)$$

де $\alpha_{\text{гран.}} = 3,9 \cdot T^{0,46} \cdot P^{-0,02}$ д.о.

Значення константи швидкості

$$K = A \cdot \exp\left(-\frac{8000}{RT}\right), \text{ c}^{-1} \quad (3)$$

де $A = 9 \cdot 10^5 \cdot \exp(-0,013 \cdot P^2) - 3,5 \cdot 10^3 \cdot P + 7,8 \cdot 10^5$;

R – універсальна газова стала, 8,314 Дж/(моль·К);

P – тиск, ат.

Розбіжність розрахункових значень з експериментальними даними складає 0,3–0,6% [19].

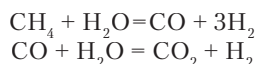
Кінетика парокисневого окиснення NH_3 під тиском досліджувалась В.І.Атрощенко, В.М. Черкашиним,

А.П. Засоріним, Н.М. Ушаковою та ін. [20, 21]. Автори показали, що співвідношення початкових реагентів впливає на ступінь окиснення NH₃ і на загальний вихід NO₃. Установлено, що при температурі 920 °С, лінійній швидкості газу 3,3 м/с високий вихід NO підтримується при співвідношенні O₂:NH₃=1,30–1,35. При змінюванні тиску від 0,2 до 0,9 МПа ступінь окиснення NH₃ змінюється від 94,5 до 89,5 % відповідно. Установлено, що час контактування при постійній швидкості газу змінюється в залежності від температури й тиску. З'ясовано, що при тискові 0,6 МПа й температурі 920 °С час контакту становить 1,21·10⁻⁴ с. Авторами досліджено вплив температури, лінійної швидкості, кількості каталізаторних сіток, концентрації H₂O (п) на технологію та безповоротні втрати платинового каталізатору. Запропоновано оптимальні технологічні умови для промислового виробництва капролактаму [20, 21].

В.І. Атрощенко, В.М. Черкашин, Н.М. Ушакова в роботі [22] показали, що в процесі парокисневого окиснення NH₃ на платиновому каталізаторі під атмосферним тиском при навантаженні 400–800 кг NH₃/м² у добу та об'ємному вмісті в сухій суміші 28–33,5 % NH₃ при O₂:NH₃=2,5–1,7 ступінь конверсії сягає 96–97%. Висока ступінь конверсії зберігається до концентрації NH₃ у суміші 41–42%. За результатами наукових досліджень автори рекомендували здійснювали промисловий процес при співвідношенні реагентів 1,35. Це дозволило різко зменшити об'єми газів, які поступають на абсорбцію та небезпечних викидів у навколишнє середовище при збереженні продуктивності контактного апарату [22].

Кінетика конверсії природного газу парою води під тиском досліджувалась В.І. Атрощенко, Г.Л. Звягінцевим, М.О. Гаврею, З.М. Щедрінською, Ш.К. Раманом та ін. [23, 24] починаючи з 60-х років ХХ ст. У цей час усе більше зростало виробництво аміаку, спиртів, для яких необхідно було збільшувати об'єми водню. До цього основним джерелом промислового виробництва H₂ було низькотемпературне вилучення водню з коксового газу, газифікація твердого палива. Але ці способи не забезпечували стрімке зростання застосування H₂ у різних галузях промислового виробництва.

У великих масштабах виробництво H₂ базується на реакції неповного окиснення CH₄ (конверсія CH₄), який є основним компонентом природного газу, водяною парою (СО₂, О₂) під тиском, із подальшою конверсією СО парою води відповідно до реакції:



Дослідження кінетики конверсії CH₄ парою води проводились В.І.Атрощенко разом зі співробітниками під тиском до 4,0 МПа на різних каталізаторах у широких межах технологічних параметрів: температури, швидкості газової суміші, співвідношення початкових реагентів, тиску. Вивчено процес конверсії природного газу на нікелевому каталізаторі типу ДІАП-3 і встановлено порядок реакції за CH₄ і СО, який становить 1 та 0 відповідно. Показано, що при надлишку пару H₂O>1,2 швидкість конверсії прямо пропорційна у першій ступені і зворотно пропорційна

P_{H₂}. Доведено, що константа швидкості реакції при 0,2–4,1 МПа не змінюється й становить 31,6 атм/с⁻¹ при температурі 800°С. При цих значеннях енергія активації дорівнює 21,5 ккал/мол. Значення константи швидкості зменшується при співвідношенні H₂O:CH₄<1,2. Установлено, що при тиску 0,6–4,0 МПа продуктивність каталізатора дорівнює тиску в ступені 0,6. Авторами запропоновано окисно-відновний механізм конверсії CH₄: окиснення активних центрів каталізатора парою H₂O і відновлення їх за допомогою CH₄. З'ясована швидкість процесу, виведено рівняння кінетики процесу. Знайдені оптимальні технологічні параметри процесу рекомендовано для проектування й будівництва нових промислових виробництв. Окрім хімічної промисловості проведено дослідження кінетики конверсії CH₄ для металургійної галузі для одержання суміші газів [23, 24].

В.І. Атрощенко, Г.Л. Звягінцев запропонували кінетичне рівняння [24]:

$$-\frac{dP_{\text{CH}_4}}{dt} = k \frac{P_{\text{CH}_4}}{P_{\text{H}_2}} \left[1 - \frac{1}{K_p} \cdot \frac{P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2}^3}{P_{\text{CH}_4} P_{\text{H}_2\text{O}}} \right], \quad (4)$$

де K_p – константа рівноваги реакції конверсії CH₄;
P – парціальний тиск реагентів;
k – константа швидкості реакції конверсії CH₄.

$$k = 2,03 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(-\frac{21700}{RT}\right), \quad (5)$$

де 21700 – енергія активації, ккал/моль;

R – універсальна газова стала, ккал/моль·град.

Запропоноване рівняння кінетики конверсії CH₄ парою води дозволяє знаходити оптимальні технологічні умови, моделювати процеси, розробляти технологічні схеми виробництва й конструкції реакторів.

Кінетика конверсії СО парою H₂O під тиском.

Проблемі одержання водню із природного газу й СО приділялась увага багатьох учених. Але всі ці науковці проводили дослідження процесу під атмосферним тиском, що не могло задовольнити розвиток великотоннажного виробництва.

У 60-і роки ХХ ст. основним способом хімічного процесу виробництва H₂ був процес конверсії СО, який одержували газифікацію твердого палива. Після конверсії природного газу парою H₂O синтез-газ уміщує H₂, СО й СО₂. Подальша конверсія СО парою H₂O дозволяє додатково отримати водень. Тому разом із дослідженням процесу конверсії CH₄ проводились широкі наукові пошуки та вивчення процесу конверсії СО парою води.

Дослідження кінетики конверсії СО парою води В.І. Атрощенко проводив разом із Л.Н. Івановою [25], Б.Бібром [26], І.О. Слабуном [27], О.Я. Лобойком [27, 28] та ін.

Учені проводили дослідження на трьох типах каталізаторів: високо-, середньо- і низькотемпературних (ВТК, СТК і НТК). Автори [25–28] установили гальмуючий вплив СО₂ на швидкість реакції конверсії СО на Fe-Cr каталізаторі. Показано, що швидкість реакції пропорційна P_{CO} у першій ступені і зворотно пропорційна P_{CO₂}. Така залежність була вперше доказана В.І.Атрощенко зі співробітниками. З'ясовано, що з

підвищенням температури вище 450°C гальмування реакції оксидом вуглецю (IV) зменшується. Одержані результати дослідження дозволили розрахувати оптимальні технологічні параметри, а також кількість каталізатора.

Дослідження процесу при використанні цинк-хромового каталізатора (НТК) показали, що реакція конверсії CO протікає за рівнянням першого порядку. Установлено, що продуктивність Zn-Cr каталізатора змінюється пропорційно загальному тиску в першому ступені й швидкість реакції не гальмується продуктами процесу. Показано, що Zn-Cr каталізатор більш активний у процесі конверсії CO, ніж Fe-Cr.

Авторами [27, 28] запропоновано каталізатор удвічі активніший за рахунок уведення до складу K_2O . При цьому перероблюється більше початкового газу, що збільшує потужність існуючих промислових установок. Установлено, що підвищення тиску позитивно впливає на процес конверсії CO й за рахунок збільшення парціального тиску початкових компонентів зростає швидкість реакції.

В.І. Атрощенко, О.Я. Лобойко запропонували [28] рівняння швидкості процесу конверсії CO на Fe-Cr каталізаторі:

$$-\frac{dP_{CO}}{dt} = k P_{CO}^m P_{CO_2}^{r-\tau} M(\alpha), \quad (6)$$

де τ – порядок реакції за CO_2 ;

m – порядок реакції за CO;

k – константа швидкості реакції, ат^{0,5}·сек⁻¹;

$M(\alpha)$ – фактор, який враховує швидкість зворотної реакції;

τ – час контактування, с;

P_{CO}, P_{CO_2} – парціальний тиск CO й CO_2 у початковій суміші, ат.

Залежність константи швидкості даного процесу від температури описується рівнянням [28]:

$$k = 1,253 \cdot 10^8 \cdot \exp\left(-\frac{86000}{RT}\right) \quad (7)$$

Точність цього рівняння достатня для технологічних розрахунків.

Дослідження кінетики синтезу метанолу викликають велику зацікавленість науковців. В.І. Атрощенко і З.М. Щедрінська [29, 30] вивчали процес окиснення природного газу до формальдегіду та метанолу на промислому Zn-Cr каталізаторі. Уперше встановлено, що додавання CO_2 до початкової суміші H_2 , CO в процесі синтезу CH_3OH різко підвищує активність каталізатора, але через 6–10 годин роботи знову знижується до початкової.

В.І. Атрощенко, М.М. Караваєв і В.Є. Леонов досліджували кінетику синтезу CH_3OH із використанням чистого газу при атмосферному тиску при температурах 200–260°C. Установлено, що швидкість реакції прямо пропорційно концентрації H_2 у першому ступені й концентрації CO в ступені 0,55. При температурі 360–380°C, тиску 31,0 МПа й об'ємній швидкості 40000 год⁻¹ зі збільшенням концентрації CO_2 продуктивність каталізатора збільшується [31].

Синтез-газ для одержання CH_3OH у своєму складі має кисень. В.І. Атрощенко, І.О. Слабун, М.О. Гавря та ін. виконали дослідження з метою знаходження каталізаторів, котрі б могли зв'язувати O_2 . Установлено, що

присутність у початковому синтез-газі O_2 різко знижує активність каталізатора для синтезу CH_3OH [32].

Кінетика контактного окиснення CH_3OH у формальдегід на срібному каталізаторі була досліджена В.І. Атрощенко, І.П. Кушнарєнком [33]. Показано, що при співвідношенні $O_2:CH_3OH < 0,4$ швидкість реакції утворення CH_2O описується рівнянням першого порядку. З'ясована константа швидкості й розрахована енергія активації процесу синтезу CH_2O . Установлено, що при температурі 600°C відбувається перехід процесу з кінетичної в дифузійну область. Авторами доведено, що в процесі синтезу CH_2O швидкість реакції дегідрування збільшується при наявності в початковій суміші O_2 . Показано, що розкладання й окиснення CH_2O відбувається з утворенням CO, CO_2 і H_2 . Запропоновано рівняння для визначення оптимального часу контактування [33].

Проведено дослідження одержання формальдегіду прямим окисненням природного газу. Запропоновано каталізатори, знайдено оптимальні технологічні параметри процесу синтезу CH_2O [29].

Кінетика термоокислювального піролізу CH_4 із метою одержання C_2H_2 і H_2 під тиском до 0,6 МПа детально досліджена В.І. Атрощенко і В.І. Чаковських у 60-і роки ХХ ст. [34]. Авторами показано, що процес у промислових умовах необхідно проводити в інтервалі температур 1400–1500°C. У цьому випадку є можливість одержати максимальний вихід C_2H_2 , якщо оптимальний час реакції складає 0,003–0,01 с. Установлено технологічні умови, при яких утворюється сажа в кількості не більше 2,0–2,5 г/м³ сухого газу [34].

У ґрунтовній колективній праці “Кінетика гетерогенно-каталітичних процесів под давлением” (під ред. академіка АН УРСР В.І. Атрощенко) [5] підведені проміжні підсумки наукових досліджень гетерогенно-каталітичних процесів, що протікають під тиском і зв'язані з технологією одержання H_2 , азотно-водневої суміші, синтез-газу, метанолу, оксиду азоту (II). Автори привели методики моделювання та оптимізації хіміко-технологічних процесів із використанням одержаних кінетичних даних.

3. Висновок

Найбільш важливими напрямками наукових досліджень школи В.І. Атрощенко при вивченні кінетики гетерогенно-каталітичних процесів під тиском є такі: кінетика контактного окиснення NH_3 на платиновому каталізаторі (0,1–5,0 МПа); кінетика парокисневого окиснення NH_3 під тиском до 0,9 МПа; кінетика конверсії природного газу парою H_2O (0,1–0,4 МПа); кінетика конверсії CO парою H_2O (0,1–0,4 МПа); кінетика синтезу CH_3OH (0,1–5,0 МПа); кінетика контактного окиснення CH_3OH до CH_2O (0,1–0,7 МПа); кінетика термоокислювального піролізу CH_4 з одержанням C_2H_2 і H_2 (0,1–0,6 МПа). Результати ґрунтовних досліджень використано для створення нових технологій одержання водню, азотної кислоти, метанолу, формальдегіду та інших важливих хімічних речовин, розробки нових апаратів та обладнання, інтенсифікації існуючого промислового виробництва.

Література

1. Атрощенко В.И., Каргин С.И. Технология азотной кислоты. – М.: - Химия. – 1970. – 496 с.
2. Технология связанного азота / В.И.Атрощенко, А.М.Алексеев, А.П. Засорин и др. – К.: - Вища школа. – 1985. – 327 с.
3. Караваев М.М., Засорин А.П., Клещев Н.Ф. Каталитическое окисления аммиака. – М.: Химия. – 1983. – 232 с.
4. Производство азотной кислоты в агрегатах большой единичной мощности. – М.: - Химия. – 1985. – 400 с.
5. Кинетика гетерогенно-каталитических процессов под давлением. – Х.: Вища школа. – 1974. – 168 с.
6. Каталитические и массообменные процессы под давлением. – Х.: - Основа. – 1993. – 216 с.
7. Катализ в азотной промышленности. – К.: - Наукова думка. – 1983. – 200 с.
8. Атрощенко В.И. К определению скорости окисления аммиака на платиновой сетке // ЖПХ. – 1935. – Т.81, № 1. – С. 25 – 34.
9. Атрощенко В.И. Опыты приготовления высокоактивных сплавов для окисления аммиака // ЖПХ. – 1935. – Т.8, № 7. – С. 1222 – 1225.
10. Атрощенко В.И., Савенков А.С., Засорин А.П. Исследование контактного окисления аммиака под давлением // Вестник ХПИ. – 1968. – Вып. 2, № 32. – С. 3 – 6.
11. Дослідження процесу окислення аміаку / В.І.Атрощенко, А.П. Засорін, А.С. Савенков та ін. – Вісник АН УРСР. – 1970. – № 5. – С. 84 – 91.
12. Атрощенко В.И., Савенков А.С. Исследование кинетики окисления аммиака под давлением на платиновом катализаторе // Катализ и катализаторы. – 1970. – Вып. 3. – С. 38 – 44.
13. Атрощенко В.И., Седашева Е.Г. Кинетика окисления аммиака воздухом, обогащенным кислородом // ЖПХ. – 1941. – Т. 14, № 4-5. – С. 500 – 506.
14. Атрощенко В.И. О применении электролитического кислорода в контактном производстве азотной кислоты // Труды ХХТИ, 1944. – Вып. 4. – С. 17 – 31.
15. Атрощенко В.И., Засорин А.П., Орзулова Р.Г. О диффузионной кинетике окисления аммиака в трубчатом аппарате // ЖПХ. – 1967. – Т. 40, № 8. – С. 1722 – 1725.
16. Атрощенко В.И., Засорин А.П., Орзулова Р.Г. Окисление аммиака кислородом в струйном потоке в платиновой трубке // Изв. Вузов. Химия и хим. технология. – 1967. – Т. 10, вып. 5. – С. 542 – 545.
17. Атрощенко В.И., Савенков А.С., Засорин А.П. Кинетика каталитического окисления аммиака под давлением // ЖПХ. – 1971. – Т. 44, № 7. – С. 1463 – 1466.
18. Исследование реакции окисления аммиака / В.И.Атрощенко, И.Е.Коробчанская, А.А.Сахаров, Г.И.Гринь. – Кинетика и катализ. – 1977. – Т. 18, вып. 1. – С. 179 – 182.
19. Савенков А.С., Бесков В.С. Кинетика процесса окисления аммиака на платиновом катализаторе под давлением / В кн.: Кинетика гетерогенно-каталитических процессов под давлением. – Х.: Вища школа. – 1974. – С. 67 – 83.
20. Засорин А.П., Черкашин В.Н., Атрощенко В.И. О кинетике окисления аммиака кислородом в присутствии паров воды // Изв. Вузов. Химия и хим. технология. – 1967. – Т. 2, вып. 2. – С. 1161 – 1165.
21. Парокислородное окисление аммиака под давлением на платиновых сетках / В.И.Атрощенко, В.Н.Черкашин, Н.М.Ушакова, Н.Ф.Клещев // Изв. Вузов. Химия и хим. технология. – 1978. – Т. 21, вып. 6. – С. 756 – 759.
22. Черкашин В.Н., Ушакова Н.М. Активность катализаторов в процессе парокислотного окисления аммиака // В кн.: Катализаторы в азотной промышленности. Под ред. В.И.Атрощенко. – Х.: Вища школа. – 1977. – С. 16 – 28.
23. Атрощенко В.И., Гавря Н.А., Щедринская З.М. Исследование процесса каталитического окисления природного газа // Изв. Вузов. Химия и хим. технология. – 1960. – Т. 3, вып. 4. – С. 773 – 776.
24. Атрощенко В.И., Раман Ш.К., Звягинцев Г.Л. Кинетика процесса конверсии природного газа водяным паром под давлением // ЖПХ. – 1969. – Т. 24, № 7. – С. 1496 – 1503.
25. Атрощенко В.И., Иванова Л.Н. Кинетика реакции конверсии СО водяным паром под высоким давлением // ЖПХ. – 1964. – Т. 37, № 7. – С. 517 – 519.
26. Атрощенко В.И., Бибр Б. Исследование конверсии окиси углерода водяным паром при повышенном давлении // ЖПХ. – 1959. – Т. 32, № 5. – С. 997 – 1005.
27. Слабун И.А., Лобойко А.Я., Семенова Т.А. Низкотемпературная конверсия СО при низком соотношении пара к сухому газу // В кн.: Каталитические и массообменные процессы под давлением в технологии неорганических веществ. – Х.: Основа. – 1993. – С. 5 – 22.
28. Лобойко А.Я. Кинетика конверсии окиси углерода парами воды под давлением // В кн.: Кинетика гетерогенно-каталитических процессов под давлением. – Х.: Вища школа. – 1974. – С. 27 – 37.
29. Атрощенко В.И., Щедринская З.М. О катализаторах для гетерогенного окисления природного газа до формальдегида и метанола // Труды ХПИ. – 1962. – Т. 29, вып. 1. – С. 19 – 25.
30. Атрощенко В.И. Катализаторы для процесса окисления природного газа до формальдегида и метанола давлением // ЖПХ. – 1965. – Т. 38, № 3. – С. 649 – 654.
31. Атрощенко В.И., Леонов В.Е., Караваев М.М. О термодинамическом исследовании влияния двуокиси углерода на равновесный выход метанола // Хим. технология. – 1971. – Вып. 22. – С. 68 – 73.

32. Атрощенко В.И., Слабун І.О., Гавря М.О. Роль кисню в процесі синтезу метанолу на мідьвмісному каталізаторі // Вісник ХПІ. – 1973. - № 79, вип. 5. – С. 17 – 19.
33. Атрощенко В.И., Кушнарченко И.П. Кинетика контактного окисления метанола в формальдегид на серебряном катализаторе под давлением // Изв. Вузов. Химия и хим. технология. – 1965. – Т. 8, вып. 1. – С. 47 – 54.
34. Атрощенко В.И., Часовских В.И. Исследование процесса получения ацетилена термоокислительным пиролизом природного газа под давлением // Изв. Вузов. Химия и хим. технология. – 1968. – Т. 11, вып. 4. – С. 438 – 442.

УДК 66.074

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ГАЗОВОЗДУШНОГО ПОТОКА В РОТОРНОМ МАССООБМЕННОМ АППАРАТЕ

Рассмотрены вопросы, связанные с очисткой отходящих газов в роторном массообменном аппарате. Разработана методика проведения эксперимента по определению эффективности очистки воздуха. Смонтирована лабораторная установка для проведения лабораторных испытаний. Получена графическая зависимость эффективности очистки воздуха от количества подаваемой жидкости.

И. В. Питак*

Аспирант кафедры химической техники и промышленной экологии
E-mail: opitak@kpi/kharkov/ua

А. Г. Трошин*

Доцент кафедры интегрированной техники процессов и аппаратов
Телефон: (057) 7076304

В. Ф. Моисеев*

Профессор кафедры химической техники и промышленной экологии, кандидат технических наук
Телефон: (057) 7076392

*Национальный технический университета
«Харьковский политехнический институт»
61002, г. Харьков-2, ул. Фрунзе, 21

1. Введение

Очистка отходящих промышленных газов является одной из важных технологических задач большинства производств. Поэтому разделение газовых неоднородных систем относится к числу широко распространенных основных процессов химической технологии.

Очистка газов от взвешенных в них твердых или жидких частиц проводится для уменьшения загрязненности воздуха, улавливания из газа ценных продуктов или удаления из него вредных примесей, отрицательно влияющих на последующую обработку газа, а также разрушающих аппаратуру.

В промышленных условиях пыль может образовываться в результате механического измельчения твердых тел, при горении топлива, при конденсации

паров, а также при химическом взаимодействии газов, сопровождающемся образованием твердого продукта.

Под пылью понимают любые твердые частицы, содержащиеся в выбрасываемых в атмосферу газах. В тоже время твердые частицы могут быть классифицированы по природе, токсичности, составу, растворимости, по размерам частиц, по склонности к агрегации, адгезии, слипаемости и т.д. для улавливания пыли применяют соответствующее пылеулавливающее оборудование. Пыль является одним из наиболее много тоннажных выбросов в атмосферу. Технологические процессы во многих отраслях народного хозяйства связаны с переработкой, транспортировкой и хранением сыпучих, тонко измельченных материалов. Это приводит к интенсивному загрязнению воздушного пространства пылью.