

можуть бути використані в лазерній техніці для селекції довжин хвиль генерації лазерів, в спектральних приладах. Але для з'ясування можливості їх застосування у такий спосіб необхідні додаткові, переважно, експериментальні дослідження.

[1] T. K. Gaylord, M. G. Moharam, Analysis and Applications of Optical Diffraction by Gratings, IEEE. 1985, Vol. 73, N 5, p. 53 – 103.

[2] IBM Holographic Optical Storage Team, Holographic storage promises high data density, Laser Focus World, November 1986, p. 81.

[3] A. Yariv, P. Yeh, Optical waves in crystals, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York., 1984.

[4] V. M. Fitio, A new approach to the diffraction theory of volume holograms with spatial change of refraction index, Proc. SPIE, 2000, Vol. 4148.

[5] H. Kogelnik, Coupled wave theory for thick hologram gratings, Bell Syst. Tech. J., 1969, Vol. 48, p. 2909 – 2947.

[6] Х. Такума, Физика полупроводниковых лазеров, М. Мир, 1989, с.310.

[7] Тихонов Е. А., Смирнова Т. Н., Гюльназаров Э. С., Голографическая запись на фотополимерных материалах, Квантовая электроника, Київ, Наукова думка, 1991, №40, с.1-25.

УДК 621.373.43:537.523

Чигінь В.І., Вакарин Е.В.* , Скульський М.Ю.

ДУ “Львівська політехніка”

***Інститут конденсованих середовищ НАН України**

РОЗДІЛЕННЯ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ ПРИ ЗАКРУЧЕННІ ІОНІЗОВАНОГО ПОТОКУ В ПЕРЕХРЕСНИХ ЕЛЕКТРИЧНОМУ І МАГНІТНОМУ ПОЛЯХ

© Чигінь В.І., Вакарин Е.В., Скульський М.Ю., 2000

Здійснено теоретичні оцінки основних параметрів закручення іонізованого газового потоку в перехресних електричному і магнітному полях та ефективності розділення його компонент із відмінними атомними масами завдяки відцентровій силі. Показано, що, прикладаючи напругу U 1000..10000 В між центральним електродом-дротом (діаметр 0,01 м) і циліндром (діаметр 0,1 м) та аксіального магнітного поля H 0.05..1 Т при ступені іонізованості γ газової суміші 10^{-7} .. 10^{-5} , у камері завдовжки 0,1 м можна досягнути обертової швидкості газу десятки-сотні м/с і ступеня розділення R водню і пари сірки десятки-тисячі одиниць. Значення R експоненційно зростає із ростом U , H , γ і молекулярної маси сірки модифікацій S_L .. S_8 . Експериментально перевірена принципова можливість використання нового типу низьковольтних іонізаторів для підвищення ступеня іонізованості газового потоку.

The estimations of the main parameters of ionised gas flow rotation in crossed electric and magnetic fields and also the separating efficiency of gas components with

different atomic masses have been theoretically carried out. It is shown that using the voltage U of $1000..10000$ V between the central electrode-wire (diameter of $0,01$ m) and the cylinder (diameter of $0,1$ m) and the axial magnetic field H of $0.05..1$ T at the gas ionizing level of $10^{-7}..10^{-5}$ one can attain the gas rotation velocity of tens-hundreds m/s and the coefficient R of separating of the hydrogen and sulphur vapour of tens-hundreds units in the chamber with length of $0,1$ m. The value R increases exponentially as U , H , γ and sulphur molecular mass ($S_{1..}$ S_8) rise. It was checked experimentally the principal possibility of using the new type low energy ionizers to increase the gas flow ionicity.

Вступ

Основними методами очищення викидних промислових газів від важких аерозолей сьогодні вважаються механічні, зокрема відцентрові, та електростатичні [1]. У зв'язку із дуже слабким впливом механічних та електричних сил на молекулярні частинки використання таких апаратів для вловлення газових домішок, а також аерозолей із розмірами, меншими від 1 мкм, є неможливим. Через значний гідравлічний опір абсорбційних та адсорбційних апаратів при протіканні великих об'ємів газів вони майже не вживаються для очищення газоповітряних викидів від домішок із низькими концентраціями. Аналогічні проблеми існують при розділенні і глибокому очищенні технологічних газів [2].

У роботі запропоновано фізичну модель сепарації газових сумішей у взаємоперпендикулярних електричному і магнітному полях та виконано теоретичні та окремі експериментальні дослідження цього процесу. Числові розрахунки проведено на прикладі суміші водню як основного газу і пари сірки як домішкової компоненти. Метод полягає у попередній іонізації газу, закрученні іонів у перехресних електричному (напрявленому вздовж радіуса циліндричного апарата) і магнітному (напрявленому вздовж осі) полях, наступному прискоренні всієї маси газу під поляризаційним впливом іонів до високих швидкостей і відділенні важких іонізованих частинок (молекул сірки, аерозолей) від легких молекул основного газу завдяки відцентровій силі. Очищений легкий газ виходить крізь приосьовий отвір у внутрішньому циліндрі, а відкинуті важкі домішки або осаджуються на стінках зовнішнього циліндра (аерозолі сірки, сажі), або виводяться із невеликою частиною газу-носія крізь отвори у цьому циліндрі. Задача має конкретне практичне застосування у зв'язку із необхідністю доочищення природного газу – метану від сірководню та отримання чистої сірки [3]. Ставиться питання про можливість використання результатів роботи під час проектування апаратів для вловлення високодисперсних аерозолей цементу, сажі і т.п.

Теоретичні оцінки

Допускаємо, що попередньо іонізованими є тільки молекули домішки, наприклад, завдяки прилипанню електронів (молекули сірки – електровід'ємні, водню – електроодатні). Вважаючи відомими концентрацію іонів домішки (надалі – “іонів”) n_i та їх рухливість b_i при атмосферному тиску, розраховуємо максимальні швидкості іонів u_i і газу загалом u_r , час t_i відходу іонів на стінки зовнішнього циліндра і час t_R досягнення максимального розділення компонент, ступінь розділення R (відношення концентрації атомів домішки при радіусі r_u зовнішнього циліндра до їх концентрації в приосьовій області). Ці величини отримуємо в залежності від геометрії (діаметра $d_u=2r_u$ і висоти h_u циліндра), напруженостей електричного E і магнітного H полів, ступеня іонізованості газу γ ($\gamma = n_i/n_a$,

де n_a – концентрація молекул основного газу). Виходячи із закону збереження імпульсу іона під час руху у в'язкому середовищі у схрещених радіальному E й аксіальному H полях [4], запишемо рівняння для його швидкості:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = e \cdot E + \frac{e}{c} \cdot [v_i \cdot H] - \mu \cdot v \cdot v_i + \frac{m_i \cdot v_{i\tau}^2}{\rho} \cdot \frac{|\rho|}{\rho}, \quad (1)$$

де $\mu = \frac{m_a \cdot m_i}{m_a + m_i}$ – приведена маса, m_i – маса іона, m_a – маса молекули основного газу, v – частота зіткнення іонів та молекул основного газу, v_i – швидкість іонів, $v_{i\tau}$ – її тангенціальна компонента, ρ – радіальна координата іона, e – його заряд, c – швидкість світла. У правій частині рівняння знаходиться сума сил, що діють на заряд: електричної, магнітної, в'язкості та відцентрова відповідно. Після виконання ряду перетворень (зокрема інтегральних перетворень Лапласа) і введення позначень частот Лармора $\omega_L = e \cdot H / (m_i \cdot c)$ і $\omega_0 = \mu \cdot v / m_i$ за методом збурень отримуємо розв'язки для тангенціальної і радіальної компонент встановленої швидкості іона у першому наближенні:

$$v_{i\tau} = -\frac{e \cdot E}{m_i} \cdot \frac{\omega_L}{\omega_L^2 + \omega_0^2} - \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{e \cdot E}{m_i} \right)^2 \cdot \left[\frac{\omega_L}{\omega_L^2 + \omega_0^2} \right]^3, \quad (2)$$

$$v_{i\rho} = -\frac{e \cdot E}{m_i} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0^2 + \omega_L^2} - \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{e \cdot E}{m_i} \right)^2 \cdot \frac{\omega_0^2 \cdot \omega_L}{(\omega_0^2 + \omega_L^2)^3}.$$

Частоту зіткнення ν можна визначити із залежності $\nu = n_a \cdot v_i \cdot \delta_{ia}$, де δ_{ia} – переріз пружного розсіяння іонів на атомах основного газу. Попередня оцінка для сірки і водню дає результат: $n_a \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $v_i \approx 10^3 \text{ см/с}$, $\delta_{ia} \approx 5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, $\omega_0 \sim \nu \approx 10^7 \text{ с}^{-1}$.

Іони з часом передають імпульс основному газу. На газ діє сила внутрішнього “тертя” з іонами і сила тертя до стінок камери:

$$M_\Gamma \cdot \frac{dv_\Gamma}{dt} = \mu_{i\Gamma} \cdot v \cdot v_i - \alpha \cdot v_\Gamma^2, \quad (3)$$

де M_Γ – маса всього газу, v_Γ – його швидкість, $\mu_{i\Gamma}$ – приведена усереднена маса всіх іонів і всіх молекул основного газу, α – коефіцієнт аеродинамічного опору стінок. З урахуванням наступних позначень

$$\kappa^2 = \frac{\mu_{i\Gamma} \cdot v \cdot v_i}{\alpha} \quad \text{і} \quad \delta = \frac{2\alpha \cdot \kappa}{M_\Gamma} \quad (4)$$

отримуємо швидкість обертового руху газової суміші:

$$v_\Gamma = \kappa \cdot \frac{e^{\delta \cdot t} - 1}{1 + e^{\delta \cdot t}}. \quad (5)$$

Для обчислення часу t_R і коефіцієнта R розділення газових компонент використали відповідні формули із праці [5]:

$$t_R = \frac{kT \cdot r_y^2}{D \cdot (m_o - m_{oz}) \cdot v_\Gamma^2}, \quad (6)$$

$$R = \exp \left\{ \ln \left(\frac{r_y}{r_0} \right) \cdot \left[\frac{kT}{(m_\partial - m_{O_2}) \cdot v_{\Gamma}^2} \right]^{-1} \right\}, \quad (7)$$

де k – стала Больцмана, T – температура газу, r_0 – радіус центрального електрода, D – коефіцієнт дифузії, m_∂ і m_{O_2} – маси молекул домішки і основного газу відповідно. Коефіцієнт тертя α прийняли за відомими співвідношеннями із аеродинаміки дозвукових швидкостей [6].

У таблиці і на рис. 1 наведено типові результати розрахунків параметрів

Результати розрахунків основних параметрів закручення іонізованого газу та розділення водню і домішки одноатомної сірки S_I при $\gamma = 10^{-6}$

H , Т	U , В	v_i м/с	$v_{\Gamma mx}$ м/с	t_R , с	R
0,05	1000	200	11,3	41,0	1,003
0,1	2000	410	32,0	10,0	1,02
0,1	5000	1020	80,1	4,1	1,19
0,1	10000	200	160,3	2,0	2,06
1,0	1000	220	50,9	1,9	1,07
1,0	5000	1010	253,2	0,4	6,2

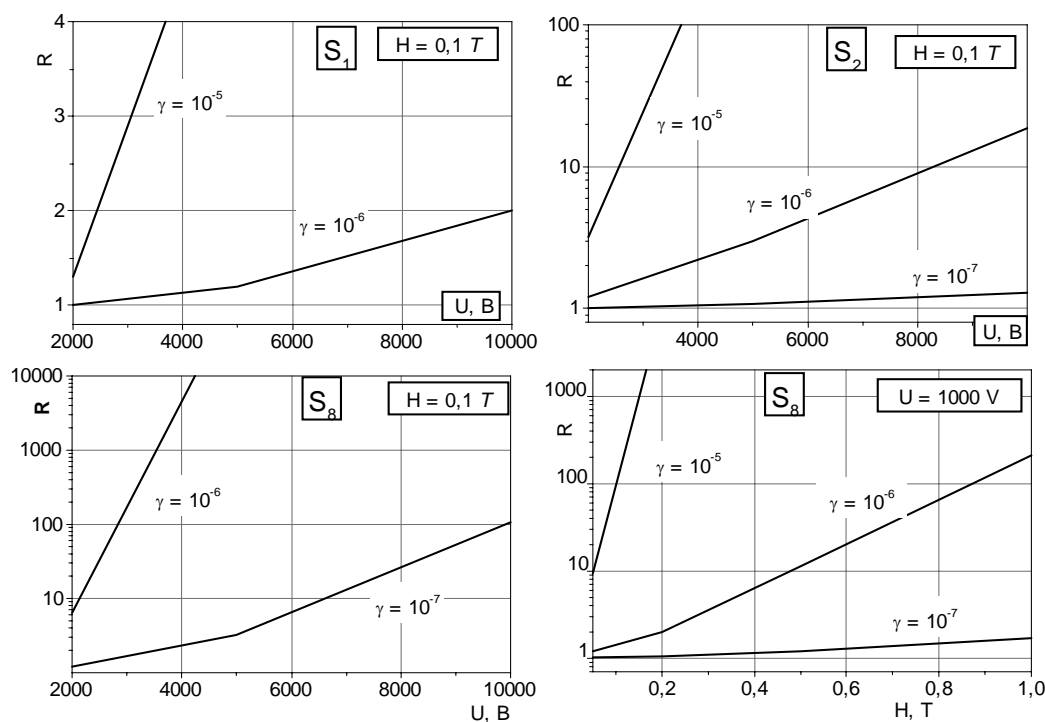


Рис. 1. Обчислені залежності ступеня розділення R водню і пари сірки різних модифікацій від напруги між електродами U і напруженості магнітного полів H при різних значеннях ступеня іонізованості газу γ

розділення молекул водню і пари сірки різних модифікацій (S_1 , S_2 , S_8), отриманих за формулами (2.7) при радіусі циліндра установки (рис.2) 0,05 м і його висоті 0,05 м, а також

при різних напругах між електродами (1000..10000 В), напруженостях магнітного поля (0,05..1 Т) і ступенях іонізованості γ (10^{-7} .. 10^{-5}) молекул домішки. У таблиці швидкість газу $v_{Гмх}$ відповідає максимальній ($t \rightarrow \infty$).

Як видно із обчислених результатів, спостерігається істотний експоненційний ріст ступеня розділення R при зростанні маси молекул сірки, полів E і H та ступеня іонізованості газу γ . Особливо високих значень (порядку тисяч одиниць) коефіцієнти R сягають при масі іона молекули S_8 $m = 8 \cdot 32$ а.о. Осідання таких молекул (і більших аерозолей) повинно бути повним. При цьому напруженості полів E і H є не надто високими, їх можна реально досягнути.

Експериментальна установка і результати вимірювань

Як видно із “робочих” формул (4) – (7), основними зовнішніми параметрами, які відповідають за ефективне закручення заданої газової суміші, є E , H і γ . Значення E , H , наведені у таблиці і на рис.1, експериментально досягають відносно легко. Значно складнішим завданням є створення необхідних ступенів іонізації газу, однорідної по всьому об’ємі газового сепаратора. Для проведення відповідних дослідів виготовили експериментальну установку, схема якої зображена на рис.2. Емітером електронів служить

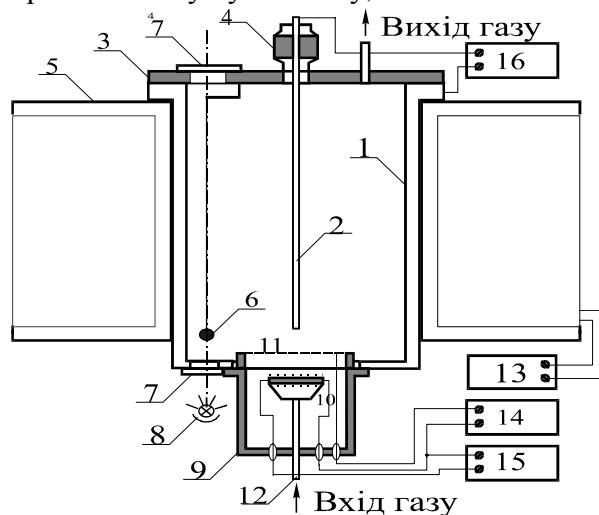


Рис.2. Експериментальна установка
1 – корпус-циліндр, 2 – центральний електрод, 3 – фланець, 4 – ізолятор, 5 – котушки електромагніта, 6 – кулька-зонд, 7 – віконця, 8 – лампочка, 9 – екран емітера, 10 – емітер електронів, 11 – сітка, 12 – вхід газу, 13 .. 15 – низьковольтні джерела напруги, 16 – високовольтне джерело напруги

низьковольтний інжектор електронів (з термоемісією і коронним розрядом) із обдуванням електропозитивними газами, які підлягають ефекту Рамзауера [7]. Висока напруга подається між корпусом-циліндром 1 і центральним електроодом-стрижнем 2. В ролі джерела постійного магнітного поля використано котушку електромагнітної системи відхилення пучка іонів мас-спектрометра МИ-1305. На тонкій нитці підвішено екрановану від впливу електричного поля легку алюмінієву кульку-зонд 6, відхиленням якої від положення рівноваги можна реєструвати слабкий обертовий рух газу.

Пропускаючи крізь емітер 10 і циліндр 1 газ із об’ємною витратою 5..25 мл/с, вмикали джерела напруг (14..16) і пористий катод емітера прогрівався до досягання максимального струму емісії. Вимірювали струм електронів на циліндрі 1 при різних відштовхуючих потенціалах електрода 2. При оптимальних співвідношеннях міжелектродних (1,2,10,11) напруг і прикатодних швидкостей газу досягнуто максимального значення струму 2,2 мА. При цьому максимальний усереднений ступінь іонізованості газу в об’ємі 1, обчислений з урахуванням середньої швидкості дрейфу електронів при відомому розподілі циліндричного електричного поля [9], є порядку $5 \cdot 10^{-7}$. Враховуючи дуже високі коефіцієнти

прилипання електронів до електровід'ємних молекул типу сірки при атмосферному тиску [9], можна вважати, що задана конструкція іонізатора дозволяє досягнути достатніх для розділення пари сірки і водню значень ступеня іонізованості їх газової суміші із об'ємною витратою порядку десятків мл/с.

Висновки

Здійснені теоретичні оцінки процесу закручення іонізованого газового потоку в перехресних постійних електричному і магнітному полях і наступного розділення газових компонент дають підставу стверджувати про можливість досягнення значного розділення (особливо важких молекул сірки – типу S_6 , S_8 , високодисперсних аерозолей) при використанні не надто високих, доступних на практиці E , H полів. Очевидно, що дуже високі швидкості газу і коефіцієнти розділення компонент отримано при спрощених допущеннях, які не враховують можливості проходження ряду елементарних і колективних процесів у досить-таки високоіонізованому газовому середовищі ($\sim 10^{12}..10^{14}$ іонів у $см^3$). Надалі слід врахувати розподіли швидкостей електронів і втрати їх енергії за рахунок непружних взаємодій (збудження, перезарядження і т.п.), відлипання електронів, утворення іонів з протилежним знаком за рахунок ударної іонізації та їх “гальмівний” рух у протилежному напрямку, температурні залежності кінетичних функцій при високих швидкостях зарядів та ін. При високих швидкостях газів слід очікувати зворотного процесу – зривання осілих частинок із поверхні циліндра і повертання в об'єм газу. Результати вимірювань показали, що розділення газів за запропонованою методикою можливе при використанні низьковольтних іонізаторів з обдуванням електрододатними газами, зокрема з використанням низькотемпературних термоелімітерів. Експерименти слід продовжити у напрямі удосконалення їх приосьової конструкції і підвищення однорідності розподілу інжекттованих зарядів.

[1] Справочник по пыле- и золоулавливанию// М.Биргер и др., под общей ред. А.Русанова. М. 1983, 312 с.

[2] Чигінь В., Білий Я., Корбецький Р. А.с. СССР № 1660752. Апарат для розділення газів, 1991.

[3] Дослідження можливості і доцільності отримання надчистої сірки і умов отримання нерозчинної і кристалевої сірки, а також методів сепарації сірки, в тім числі аерозольної, із багатокомпонентної газової суміші при плазмохімічному розкладі сірководню. Звіт НДР N 4931 // Яворський В. і ін., 1990.

[4] Смирнов Б. Физика слабоионизированного газа.- М., 1985, - 423 с.

[5] Русанов В., Фридман А. Физика химически активной плазмы. –М., 1987, -415с.

[6] Идельчик И. Аэродинамика промышленных аппаратов. – М., 1982.

[7] Чигінь В. Вісник ДУ "Львівська політехніка", 1996, N304, С. 73 - 75.

[8] Чигінь В., Жуковський С., Довбуш О., Вакарин Е. Патент України N 13982. Іоноелектромагнітний циклон, 1997.

[9] Райзер Ю.П. Физика газового разряда, М., 1987.