

MODELING OF DYNAMIC PROCESSES AND LOADS ELASTIC ELEMENTS OF LIFTING MECHANISMS OF HOISTING MACHINES START

Yu. V. Chovnyuk, I. M. Sivak

Abstract. *The mathematical model for analysis of dynamic processes and loads the elastic elements (ropes) mechanisms of load lifting cranes in the modes of start-up, taking into account the discrete-continual properties of such systems.*

Process dynamics modeling and loads the elastic elements (ropes) of the lifting mechanism of hoisting machines last usually considered as a system with lumped parameters, however, this approach does not allow to correctly assess and calculate the load on the elastic element (especially in the case of its considerable length) and take into account the processes of wave formations, fluctuations that occur in it. Therefore, the calculations of load on the elastic element lifting machines require significant changes to existing approaches of normalization (and engineering calculation methods) to the evaluation and analysis of phenomena arising in the rope as the system with distributed parameters (especially in the modes of start-up braking the machine when developing a significant load on all of its components).

Offered adequate mathematical model of dynamic processes and loads the elastic elements (ropes) mechanisms of load lifting cranes in the modes of start-up.

Exact analytical solutions of this model, which properly reflect its (system) a discrete-continual properties.

Such approaches and solutions obtained in the work may send in the future to improve and Refine existing methods of engineering calculation of such systems.

Keywords: *modelling, dynamic process, load, elastic element, lifting mechanism*

УДК 662.767.2:636.5

РЕЦИРКУЛЯЦІЯ ГАЗОВОЇ ФАЗИ З ЇЇ ОЧИЩЕННЯМ ПРИ МЕТАНОВІЙ ФЕРМЕНТАЦІЇ КУРЯЧОГО ПОСЛІДУ

А. І. Салюк, кандидат технічних наук

С. О. Жадан, Є. Б. Шаповалов, аспіранти

Національний університет харчових технологій

e-mail: zhadan.nuft@gmail.com

Анотація. *При метановій ферментації курячого посліду утворюється значна кількість амонійного азоту та сульфідів, що*

© А. І. Салюк, С. О. Жадан, Є. Б. Шаповалов, 2016

можуть пригнічувати процес. Інгібування виробництва біогазу здатне спричинити значні економічні втрати при роботі біогазової установки. Регулювання концентрації інгібіторів у реакторі має підвищити стабільність та ефективність його роботи. Зниження концентрації амонійного азоту і сульфідів безпосередньо під час метанової ферментації можливе за рахунок рециркуляцію біогазу з його очищенням. З огляду на значні об'ємні витрати газу, метою роботи було оцінити доцільність використання даного підходу для підвищення стабільності і ефективності процесу. Проведено порівняння кількості енергії, яка може бути отримана з біогазу з кількістю енергії, яка необхідна для роботи компресора для зниження вмісту амонійного азоту до прийнятного для роботи біогазової установки рівня. Основними факторами, що контролюють видалення аміаку і сірководню є pH, температура і витрати газу. При цьому параметри вилучення інгібіторів обмежені фізіологічними межами метаногенного співтовариства. Мінімальне споживання енергії компресором при вилученні амонійного азоту становить від 41,1% до 233,6%, а сульфідів – від 0,6% до 4,9% по відношенню до кількості енергії, яку можна отримати з біогазу. Таким чином, застосування рециркуляції газової фази з її очищенням для зменшення концентрації амонійного азоту є недоцільним з точки зору енерговитрат, у той час як її застосування для зменшення концентрації сульфідів може розглядатись як прийнятне.

Ключові слова: курячий послід, метанова ферментація, біогаз, рециркуляція, інгібування, амонійний азот, сульфід

Постановка проблеми. Особливістю курячого посліду є високий вміст азоту та сірки. У результаті метанової ферментації значна їх частина переходить в амонійний азот та сульфід, що можуть пригнічувати процес. Регулювання концентрації інгібіторів у реакторі має підвищити стабільність та ефективність його роботи.

Аналіз останніх досліджень. Ебауелєйнієн, Де ла Рубіа і Уокер пропонують використовувати рециркуляцію газової фази (біогазу) з її очищенням для зниження концентрації амонійного азоту в рідкій фазі безпосередньо під час метанової ферментації [1, 3, 7, 12]. Процес вилучення аміаку при рециркуляції біогазу близький до продувки повітрям інфлюенту та ефлюенту. Чжан і Марку таким чином знижували концентрацію амонійного азоту перед подачею відходів тваринництва у реактор [9, 16, 17]. Лей і Гастін проводили продувку ефлюенту з реакторів, що переробляли свинячий гній з метою виробництва мінерального добрива, збільшення обсягів внесення отриманого органо-мінерального добрива на територіях, що є чутливими до азоту, зниження негативного впливу на

навколишнє середовище при його зберіганні [6, 13]. Контроль концентрації амонійного азоту створює передумови для рециркуляції рідкої фракції ефлюенту. Можливість рециркуляції рідкої фракції після відповідної обробки для курячого посліду була показана Білостоцьким, Ні, Ву [2, 8, 11]. Віман здійснювали рециркуляцію біогазу для вилучення сірководню при метановій ферментації стічних вод шкірообробного виробництва [14]. Біжманс використовували цей метод для вилучення сірководню з сульфیدогенного газліфтного біореактора для зменшення інгібуючого впливу на сульфатредуючі бактерії [4]. Однак, вилучення інгібіторів супроводжується значними витратами газу, що може зробити економічно невигідним виробництво біогазу з використанням даного підходу. Розгляд його застосування з цієї точки зору не проводився ні для амонійного азоту ні для сульфідів.

Мета досліджень було оцінити доцільність використання рециркуляції газової фази з її очищенням при метановій ферментації курячого посліду для підвищення стабільності і ефективності процесу.

Матеріали і методи дослідження. Дослідження вилучення аміаку шляхом зміни газової фази над розчином здійснювали на лабораторній установці зображеній на рис. 1.

Повітря з атмосфери мембранним компресором 4 по шлангу подавалось у бутель 5 об'ємом 1,2 дм³, у якому було розміщено 2 м шлангу і 1 дм³ води 6. Бутель 5 призначався для підігріву газу до необхідної температури. Нагріте повітря подавалось у бутель 8 об'ємом 1,2 дм³, у якому знаходилось 0,25 дм³ розчину підлученого гідроксидом натрію хлориду амонію 9. Рівномірність концентрації амонійного азоту у рідкій фазі підтримувалась за допомогою магнітної мішалки 11 (ПЕ-6110М), на яку було встановлено бутель 8. рН розчину вимірювали за допомогою рН-метра 7 (цифровий вимірювальний комплекс EINSTein LabMate з датчиком рН ENPH-A016). Бутлі і магнітна мішалка були розміщені на решічастій підставці 12 сухоповітряного термостату 13 (ТС-1/80 СПУ). З бутля 8 повітря, що містить аміак проходило крізь конічну колбу 14 об'ємом 0,25 дм³, яка слугувала збірником конденсату і запобігала потраплянню вологи у дросельний вимірювач витрат газу 15. Підтримання значення рН на необхідному рівні по мірі видалення аміаку здійснювали за допомогою подачі перистальтичним насосом 3 (НП-1М) гідроксиду натрію 2 з конічної колби 1 у бутель 8. Відбір проб здійснювався за допомогою зливу 10. Вміст амонійного азоту в модельних розчинах визначали фотометрично за методом Неслера. Вимірювання здійснювали на спектрофотометрі ULAB 102UV при довжині хвилі 400 нм.

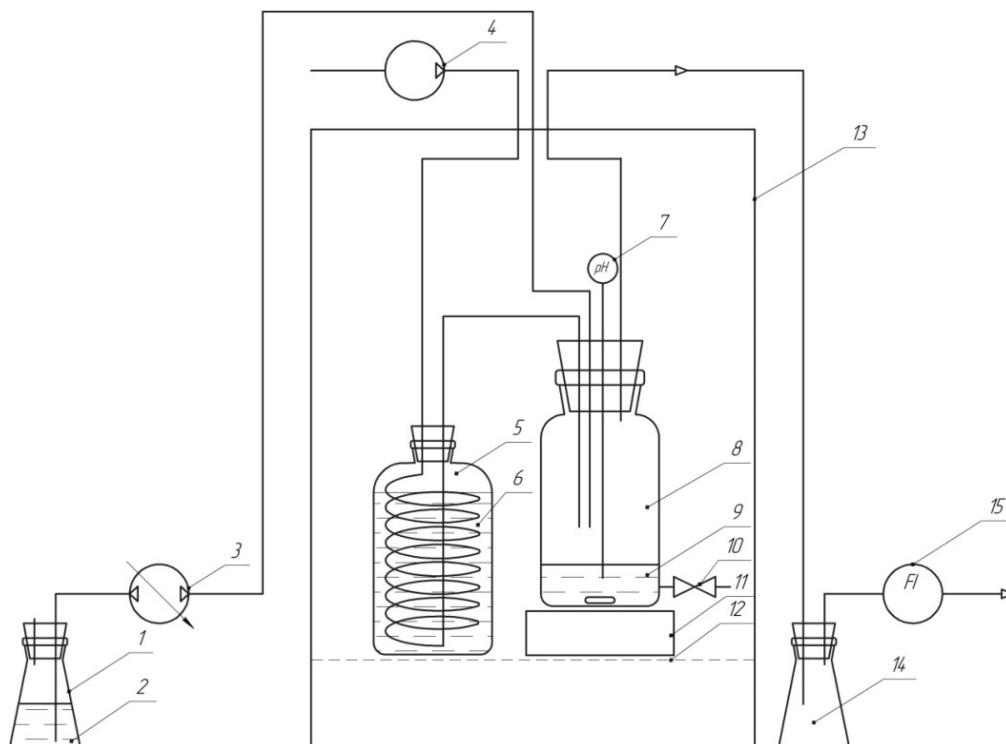


Рис. 1. Установка для вилучення аміаку шляхом зміни газової фази над розчином.

Результати досліджень. Основними факторами, що контролюють видалення аміаку і сірководню є рН, температура і витрати газу. Найбільший вплив має рН. Ефективність вилучення аміаку збільшується з підвищенням рН, а сірководню – зменшується. Метанова ферментація курячого посліду проходить у діапазоні рН 7,5-8,5. Зміна рН з метою інтенсифікації вилучення інгібіторів може порушити процес. Зі збільшенням температури підвищується ефективність вилучення газів. Однак, температура не може виходити за верхню межу термофільного режиму. Отже, параметри рециркуляції газової фази з її очищенням обмежені фізіологічними межами метаногенного співтовариства.

Для вилучення амонійного азоту і сульфідів шляхом рециркуляції газової фази з її очищенням необхідним є знаходження субстрату в рідкому або напіврідкому стані, що уможливорює здійснення необхідного масообміну і швидке вирівнювання концентрації у об'ємі. Такий стан було виявлено в при вмісті СР від 0 до 14%. Виходячи з цього концентрація СР у субстраті не повинна перевищувати 14%. З метою оцінки доцільності даного підходу при виробництві біогазу з курячого посліду, враховуючи вищесказане, порівнюємо кількість енергії, яка може бути отримана з біогазу з кількістю енергії, яка необхідна на роботу компресора для зниження вмісту амонійного азоту до прийнятного для роботи біогазової установки рівня.

Знайдемо вихід енергії з одиниці маси субстрату, кДж:

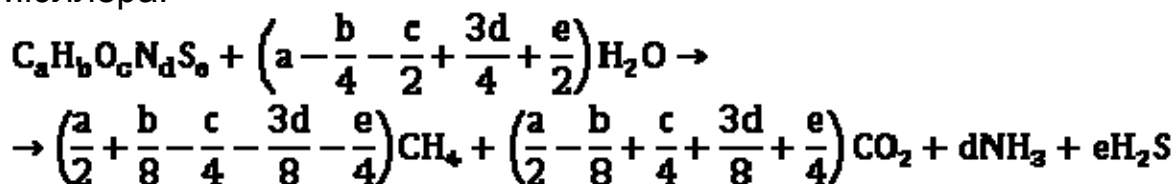
$$E_{\text{bio}} = TS \cdot VS \cdot V_{\text{CH}_4} \cdot q_{\text{CH}_4} \cdot \eta \cdot 10^{-6}$$

де: TS – вміст сухих речовин (СР), %; VS – частка сухих органічних речовин (СОР), %; V_{CH_4} – вихід метану, $\text{дм}^3 / \text{кг СОР}$; q_{CH_4} – енергетична ємність метану, $33,4 \text{ кДж} / \text{дм}^3$; η – ККД когенераційної установки, %.

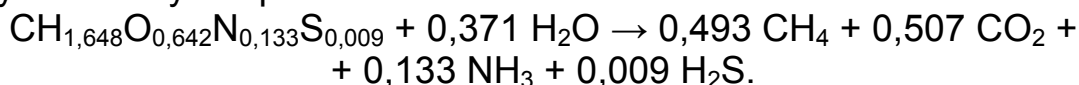
Розрахунок теоретичного виходу метану, хоча і дає завищені результати, однак дозволяє не враховувати ефект інгібування. При цьому утворення інгібіторів є пропорційним виробленому газу.

Ніу і співав. повідомили, що масова частка хімічних елементів у СОР посліду становить для С – 35,16%, Н – 4,83%, О – 30,12%, N – 5,44%, S – 0,84% [10]. Використовуючи ці дані, отримуємо брутто формулу СОР курячого посліду $\text{CH}_{1,648}\text{O}_{0,642}\text{N}_{0,133}\text{S}_{0,009}$.

Підставляючи отриману формулу у рівняння Басвела-Мюллера:



отримуємо наступне рівняння:



Теоретичний вихід метану (ТВМ), $\text{дм}^3 \text{CH}_4 / \text{кг СОР}$, розрахуємо за формулою:

$$\text{ТВМ} = \frac{22,4 \cdot 1000 \cdot \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4}\right)}{12a + b + 16c + 14d + 32e}$$

ТВМ становить $424 \text{ дм}^3 \text{CH}_4 / \text{кг СОР}$.

Враховуючи, що концентрація СР у субстраті 14%, частка СОР – 70%, загальний ККД когенераційної установки – 90%, а ККД за електроенергією – 35%, з 1 кг субстрату можна отримати 1249,1 кДж енергії, з яких 485,7 кДж електрична енергія.

Знайдемо кількість енергії, яка необхідна для роботи компресора на зниження вмісту амонійного азоту і сульфідів до прийнятного для роботи біогазової установки рівня:

$$E_p = V \cdot E_c$$

де: V – об'єм газу, який необхідно перекачати для зниження вмісту амонійного азоту / сульфідів до певного значення, дм^3 ; E_c – споживання енергії для перекачки одиниці об'єму газу, яке прийняте за $0,36 \text{ кДж} / \text{дм}^3$.

$$V = Q \cdot \Delta t$$

де: Q – об'ємні витрати газу, $\text{дм}^3/\text{с}$; Δt – час необхідний для зниження концентрації амонійного азоту до певного значення, с.

Для визначення Δt використаємо математичну модель вилучення амонійного азоту з розчину при зміні газової фази над ним запропоновану Юном і співав. [15]. Даний спосіб може бути використаний і для опису видалення сульфідів.

$$m_L = m_T \cdot \left(\frac{V_L}{V_L + a \cdot (\beta \cdot H) \cdot V_g} \right) \cdot \frac{1}{e^{\frac{a \cdot Q \cdot (\beta \cdot H) \cdot t}{V_L + a \cdot (\beta \cdot H) \cdot V_g}}}$$

де: m_T – маса амонійного азоту/сульфідів, мг/дм³; m_L – маса амонійного азоту/сульфідів у рідкій фазі, мг/дм³; a – частка вільного аміаку/сірководню в рідкій фазі; V_g – об'єм газової фази всередині ємності, дм³; V_L – об'єм рідкої фази всередині ємності, дм³; Q – витрати повітря, дм³/с; H – константа Генрі (безрозмірна); β – ступінь насичення газової фази аміаком / сірководнем.

$$\Delta t = \ln \left[\frac{m_T \cdot \left(\frac{V_L}{V_L + a \cdot (\beta \cdot H) \cdot V_g} \right)}{m_L} \right] \cdot \frac{V_L + a \cdot H \cdot V_g}{a \cdot Q \cdot (\beta \cdot H)}$$

Вміст вільного аміаку розраховували на основі концентрації амонійного азоту за рівнянням:

$$NH_3 = NH_4^+ - N \cdot \frac{1}{1 + 10^{pK_w - pK_b - pH}}$$

де: $NH_4^+ - N$ – концентрація амонійного азоту, мг/дм³, pK_w – константа іонізації води при 50 °С, що дорівнює 13,262, pK_b – константа дисоціації амонію при 50 °С, що дорівнює 4,723.

Вміст вільного сірководню розраховували на основі концентрації сульфідів за рівнянням:

$$H_2S = S \cdot \frac{1}{1 + 10^{pH - pK_a}}$$

де: S – загальна концентрація сульфідів, мг/дм³, pK_a – константа дисоціації сірководню у воді по першому ступеню.

Значення pK_a розраховували по емпіричній формулі:

$$pK_a = \frac{5765,4}{T} + 15,0455 \ln T - 98,09$$

де: T – температура, К.

Константа дисоціації сірководню у воді по першому ступеню при температурі 50 °С становить 6,697.

Значення константи Генрі в залежності від температури розраховується за формулою:

$$H = H_{ap} \exp \left[\frac{-\Delta_{soln} H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ap}} \right) \right]$$

де: H – константа Генрі при певній температурі, моль/(дм³ · атм); H_{stp} – константа Генрі за стандартних умов, моль/(дм³ · атм); $\Delta_{\text{soln}}H$ – ентальпія розчину; R – універсальна газова стала, 8,314472 Дж/(моль · К); T – температура, К; T_{stp} – температура за стандартних умов, К.

Температурна залежність:

$$\frac{\Delta_{\text{soln}}H}{R} = \frac{-d \ln H}{d\left(\frac{1}{T}\right)}$$

За стандартних умов значення константи Генрі для аміаку становить 59 моль/(дм³ · атм), а для сірководню – 0,1 моль/(дм³ · атм). Значення $\frac{-d \ln H}{d\left(\frac{1}{T}\right)}$ для аміаку – 4100 К, а для сірководню – 2100 К. Для того, щоб представити константу Генрі у безрозмірній формі необхідно скористатися виразом:

$$H = H \cdot R \cdot T$$

де: R – універсальна газова стала, 8,314472 Дж / (моль · К); T – температура, К.

Безрозмірна константа Генрі при температурі 50 °С для амонійного азоту становить 0,001852, а для сірководню – 0,649.

Виходячи з рівняння Басвела-Мюллера при повному розкладі з 1 г СОР курячого посліду утворюється 0,072 г N-NH₄⁺. Таким чином, при метановій ферментації субстрату з концентрацією СР 14% вміст амонійного азоту має становити 7056 мг/дм³. Прийнемо за прийнятний рівень концентрацію амонійного азоту 2000 мг / дм³.

На рис. 2 показано теоретичний мінімальний об'єм газу, який повинен бути пропущений над одиницею об'єму рідини для вилучення з неї певної кількості амонійного азоту при температурі, що відповідає термофільному режиму (50°С) у діапазоні значень рН, що має місце при метановій ферментації курячого посліду (7,5–8,5).

Мінімальна теоретична кількість енергії, яка необхідна на рециркуляцію газу для вилучення амонійного азоту є вищою ніж кількість електроенергії, яку можна отримати з біогазу при всіх значеннях рН середовища (рис. 3). Таким чином, робота біогазової установки не може забезпечити живлення компресора у необхідному обсязі. При рН 7,5 кількість енергії необхідна на рециркуляцію більша ніж загальна кількість енергії, яку можна отримати з біогазу, а при рН 8,0 і 8,5 вона становить 87,6% та 41,1% від загальної, відповідно. У реальних умовах ступінь насичення β не дорівнює одиниці, що обумовлює необхідність очищення значно більшої кількості біогазу. На рис. 4 показано максимальне теоретично можливе і експериментальне вилучення амонійного азоту з

модельного розчину об'ємом 0,25 дм³ при рН 8,5, витраті газу 0,103 дм³/с і температурі 50 °С.

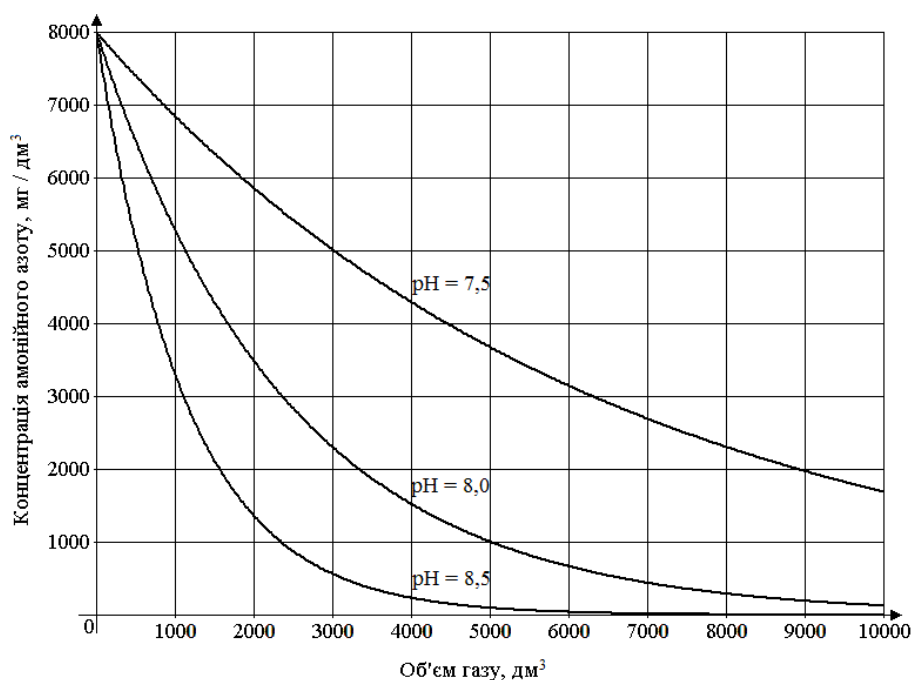


Рис. 2. Об'єм газу, який повинен бути пропущений над одиницею об'єму рідини для вилучення з неї певної кількості амонійного азоту при певному рН, степені насичення $\beta=1$ і температурі 50°C.

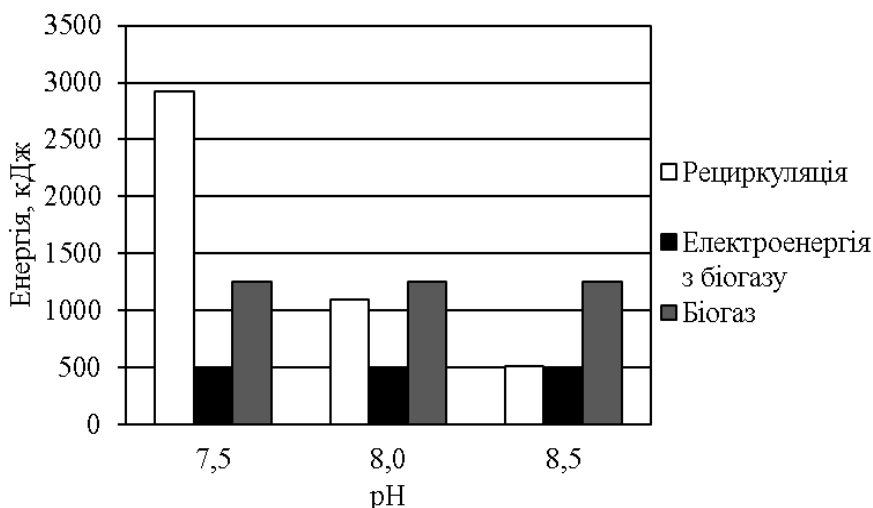


Рис. 3. Порівняння кількості енергії необхідної на рециркуляцію біогазу при вилученні амонійного азоту і енергії, яку можна отримати з нього.

Також, враховуючи об'єм відходів і необхідний об'єм газу для очищення, необхідним є встановлення компресорів з великою потужністю, що потребує значних капітальних витрат. Виходячи з

рівняння Басвела-Мюллера при повному розкладі з 1 г СОР курячого посліду утворюється 0,011 г S. Таким чином, при метановій ферментації субстрату з концентрацією СР 14% вміст сульфідів має становити 1078 мг/дм³. Прийнемо за прийнятний рівень концентрацію сульфідів 200 мг/дм³.

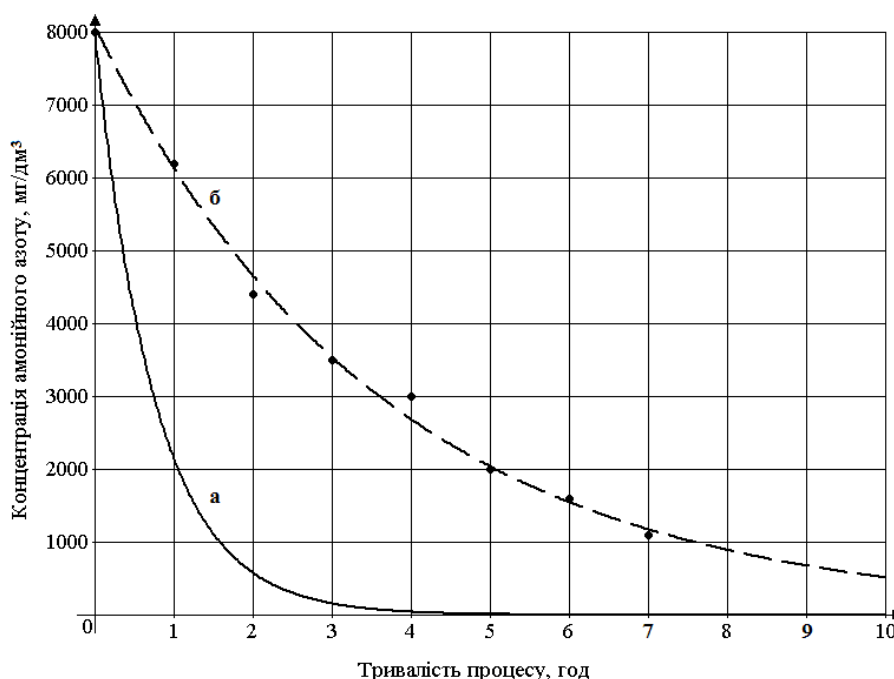


Рис. 4. Максимальне теоретично можливе (а) і експериментальне (б) вилучення амонійного азоту з модельного розчину об'ємом 0,25 дм³ при рН 8,5, витраті газу 0,103 дм³/с і температурі 50°C.

На рис. 5 показано теоретично можливий мінімальний об'єм газу, який повинен бути пропущений над одиницею об'єму рідини для вилучення з неї певної кількості сульфідів при температурі, що відповідає термофільному режиму (50°C) у діапазоні значень рН, що має місце при метановій ферментації курячого посліду (7,5–8,5).

Мінімальна теоретична кількість енергії, яка необхідна на рециркуляцію газу для вилучення сульфідів є меншою ніж кількість електроенергії, яку можна отримати з біогазу при всіх значеннях рН середовища (рис. 6). Споживання енергії компресором становить від 1,6% до 12,5% по відношенню до електроенергії і від 0,6% до 4,9% по відношенню до загальної кількості енергії, яку можна отримати з біогазу.

У дослідженні Фейлберг і співав. максимальне теоретично можливе і експериментальне вилучення сульфідів співпадало, що свідчить про те, що значення ступеню насичення β в умовах досліду було близьким до одиниці [5].

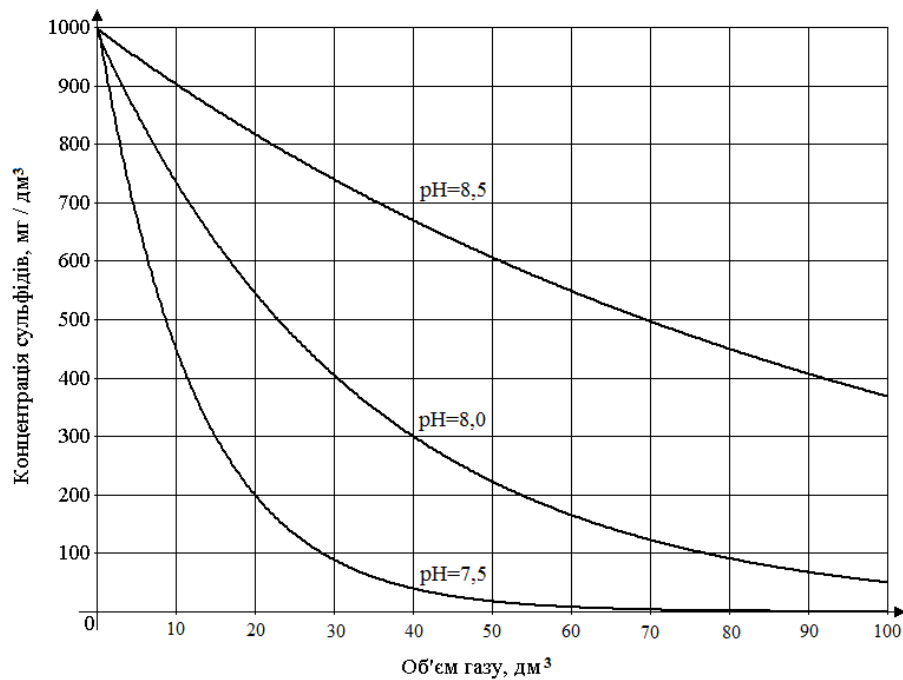


Рис. 5. Об'єм газу, який повинен бути пропущений над одиницею об'єму рідини для вилучення з неї певної кількості сульфідів при певному рН, степені насичення $\beta=1$ і температурі 50°C .

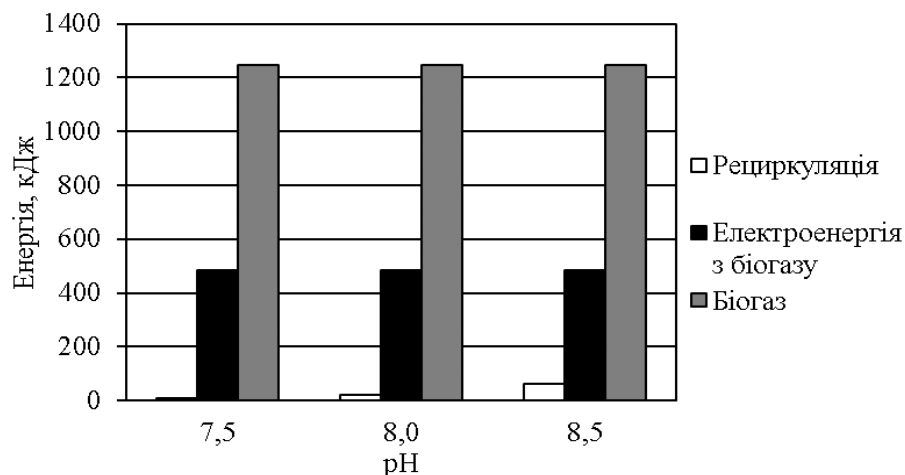


Рис. 6. Порівняння кількості енергії необхідної на рециркуляцію біогазу при вилученні сульфідів і енергії, яку можна отримати з нього.

Висновок. Застосування рециркуляція газової фази з її очищенням для зменшення концентрації амонійного азоту є недоцільним з точки зору енерговитрат, у той час як її застосування для зменшення концентрації сульфідів може розглядатись як прийнятне.

Список літератури

1. *Ammonia* removal in anaerobic digestion by biogas stripping: An evaluation of process alternatives using a first order rate model based on experimental findings /

1. *M. Walker, K. Iyer, S. Heaven, C. Banks* // Chemical Engineering Journal. – 2011. – №178. – P. 138–145.
2. Anaerobic digestion of chicken manure as a single substrate by control of ammonia concentration [Электронный ресурс] / *D. Belostotskiy, H. Jacobi, K. Strach, J. Liebetrau*. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.redbiogas.cl/wp-content/uploads/2013/07/IWA-11342.pdf>.
3. Dry anaerobic ammonia-methane production from chicken manure / *F. Abouelenien, Y. Kitamura, N. Nishio, N. Yutaka* // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2009. – Vol. 82 (4). – P. 757–764.
4. Effect of Sulfide Removal on Sulfate Reduction at pH 5 in a Hydrogen Fed Gas-Lift Bioreactor / *M. Bijmans, M. Dopson, F. Ennin* // J. Microbiol. Biotechnol. – 2008. – Vol. 18 (11). – P. 1809–1818.
5. Feilberg A. Application of PTR-MS for Measuring Odorant Emissions from Soil Application of Manure Slurry / *A. Feilberg, P. Bildsoe, T. Nyord* // Sensors. – 2015. – №15. – P. 1148–1167.
6. Gustin S. Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent / *S. Gustin, R. Marinsek-Logar* // Process Safety and Environmental Protection. – 2011. – №89. – P. 61–66.
7. Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle / *F. Abouelenien, W. Fujiwara, Y. Namba* // Bioresource Technology. – 2010. – №101. – P. 6368–6373.
8. Integrated Approach to Sustain Biogas Production in Anaerobic Digestion of Chicken Manure under Recycled Utilization of Liquid Digestate: Dynamics of Ammonium Accumulation and Mitigation Control / *S. Wu, P. Ni, J. Li* // Bioresource Technology. – 2016. – №205. – P. 75–81.
9. Markou G. Improved anaerobic digestion performance and biogas production from poultry litter after lowering its nitrogen content / *Giorgos Markou* // Bioresource Technology. – 2015. – №196. – P. 726–730.
10. Mesophilic methane fermentation of chicken manure at a wide range of ammonia concentration: Stability, inhibition and recovery / *Q. Niu, W. Qiao, H. Qiang* // Bioresource Technology. – 2013. – № 137. – P. 358–367.
11. Mono-fermentation of chicken manure: Ammonia inhibition and recirculation of the digestate / *H. Nie, H. Jacobi, K. Strach* // Bioresource Technology. – 2015. – №178. – P. 238–246.
12. Preliminary trials of in situ ammonia stripping from source segregated domestic food waste digestate using biogas: Effect of temperature and flow rate / *M. De la Rubia, M. Walker, S. Heaven* // Bioresource Technology. – 2010. – №101. – P. 9486–9492.
13. Pretreatment of anaerobic digestion effluent with ammonia stripping and biogas purification / *X. Lei, N. Sugiura, C. Feng, T. Maekawa* // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – №145. – P. 391–397.
14. Wiemann M. Anaerobic treatment of tannery wastewater with simultaneous sulphide elimination / *M. Wiemann, H. Schenk, W. Hegemann* // Wat. Res. – 1998. – Vol. 32 (3). – P. 774–780.
15. Yoon H. Ammonia Removal Model Based on the Equilibrium and Mass Transfer Principles / *H. Yoon, J. Lim, H. Chung* // Bull. Korean Chem. Soc. – 2008. – №29. – P. 555–561.
16. Zhang L. Ammonia stripping for enhanced biomethanization of piggery wastewater / *L. Zhang, Y. Lee, D. Jahng* // Journal of Hazardous Materials. – 2012. – №199. – P. 36–42.
17. Zhang L. Enhanced anaerobic digestion of piggery wastewater by ammonia stripping: Effects of alkali types / *L. Zhang, D. Jahng* // Journal of Hazardous Materials. – 2010. – №182. – P. 536–543.

References

1. Walker, M., Iyer, K., Heaven, S., Banks, C. (2011). Ammonia removal in anaerobic digestion by biogas stripping: Evaluation of process alternatives using first order rate model based on experimental findings. *Chemical Engineering Journal*, 178, 138–145.
2. Belostotskiy, D., Jacobi, H., Strach, K. J. (2013). Liebetrau Anaerobic digestion of chicken manure as a single substrate by control of ammonia concentration. Режим доступу до ресурсу: <http://www.redbiogas.cl/wp-content/uploads/2013/07/IWA-11342.pdf>.
3. Abouelenien, F., Kitamura, Y., Nishio, N., Yutaka, N. (2009). Dry anaerobic ammonia-methane production from chicken manure. *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 82 (4), 757–764.
4. Bijmans, M., Dopson, M., Ennin, F. (2008). Effect of Sulfide Removal on Sulfate Reduction at pH 5 in a Hydrogen Fed Gas-Lift Bioreactor. *J. Microbiol. Biotechnol.*, Vol. 18 (11), 1809–1818.
5. Feilberg, A., Bildsoe, P., Nyord, T. (2015). Application of PTR-MS for Measuring Odorant Emissions from Soil Application of Manure Slurry. *Sensors*, 15, 1148–1167.
6. Gustin, S., Marinsek-Logar, R. (2011). Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent. *Process Safety and Environmental Protection*, 89, 61–66.
7. Abouelenien, F., Fujiwara, W., Namba, Y. (2010). Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle. *Bioresource Technology*, 101, 6368–6373.
8. S. Wu, P. Ni, J. Li (2016). Integrated Approach to Sustain Biogas Production in Anaerobic Digestion of Chicken Manure under Recycled Utilization of Liquid Digestate: Dynamics of Ammonium Accumulation and Mitigation Control. *Bioresource Technology*, 205, 75–81.
9. Markou, G. (2015). Improved anaerobic digestion performance and biogas production from poultry litter after lowering its nitrogen content. *Bioresource Technology*, 196, 726–730.
10. Niu, Q., Qiao, W., Qiang, H. (2013). Mesophilic methane fermentation of chicken manure at a wide range of ammonia concentration: Stability, inhibition and recovery. *Bioresource Technology*, 137, 358–367.
11. Nie, H., Jacobi, H., Strach, K. (2015). Mono-fermentation of chicken manure: Ammonia inhibition and recirculation of the digestate. *Bioresource Technology*, 178, 238–246.
12. De la Rubia, M., Walker, M., Heaven, S. (2010). Preliminary trials of in situ ammonia stripping from source segregated domestic food waste digestate using biogas: Effect of temperature and flow rate. *Bioresource Technology*, 101, 9486–9492.
13. Lei, X., Sugiura, N., Feng, C., Maekawa, T. (2007). Pretreatment of anaerobic digestion effluent with ammonia stripping and biogas purification. *Journal of Hazardous Materials*, 145, 391–397.
14. Wiemann, M., Schenk, H., Hegemann, W. (1998). Anaerobic treatment of tannery wastewater with simultaneous sulphide elimination. *Wat. Res.*, Vol. 32 (3), 774–780.
15. Yoon, H., Lim, J., Chung, H. (2008). Ammonia Removal Model Based on the Equilibrium and Mass Transfer Principles. *Bull. Korean Chem. Soc.*, 29, 555–561.
16. Zhang, L., Lee, Y., Jahng, D. (2012). Ammonia stripping for enhanced biomethanization of piggery wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 199, 36–42.
17. Zhang, L., Jahng, D. (2010). Enhanced anaerobic digestion of piggery wastewater by ammonia stripping: Effects of alkali types. *Journal of Hazardous Materials*, 182, 536–543.

РЕЦИРКУЛЯЦИЯ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ С ЕЕ ОЧИСТКОЙ ПРИ МЕТАНОВИЙ ФЕРМЕНТАЦИИ КУРИНОГО ПОМЕТА

А. И. Салюк, С. О. Жадан, Е. Б. Шаповалов

Аннотация. При метановий ферментации куриного помета образуется значительное количество аммонийного азота и сульфидов, которые могут подавлять процесс. Ингибирование производства биогаза способно вызвать значительные экономические потери при работе биогазовой установки. Регулирование концентрации ингибиторов в реакторе должно повысить стабильность и эффективность его работы. Снижение концентрации аммонийного и сульфидов непосредственно во время метановой ферментации возможно за счет рециркуляцию биогаза с его очисткой. Учитывая значительные объемные расходы газа, целью работы было оценить целесообразность использования данного подхода для повышения стабильности и эффективности процесса. Проведено сравнение количества энергии, которая может быть получена из биогаза с количеством энергии, которая необходима для работы компрессора для снижения содержания аммонийного азота до приемлемого для работы биогазовой установки уровня. Основными факторами, контролирующими удаления аммиака и сероводорода является pH, температура и расход газа. При этом параметры извлечения ингибиторов ограничены физиологическими пределами метаногенного сообщества. Минимальное потребление энергии компрессором при извлечении аммонийного азота составляет от 41,1% до 233,6%, а сульфидов – от 0,6% до 4,9% по отношению к количеству энергии, которую можно получить из биогаза. Таким образом, применение рециркуляции газовой фазы с ее очисткой для уменьшения концентрации аммонийного азота является нецелесообразным с точки зрения энергозатрат, в то время как его применение для уменьшения концентрации сульфидов может рассматриваться как приемлемое.

Ключевые слова: куриный помет, метановая ферментация, биогаз, очистка, ингибирование, аммонийный азот, сульфиды

RECIRCULATION OF GAS PHASE WITH ITS TREATMENT WHILE OF MATANOVI FERMENTED CHICKEN MANURE

A. I. Salyuk, S. O. Zhadan, Ye. B. Shapovalov

Abstract. When matanovi fermentation of chicken manure produces significant amounts of ammonia nitrogen and sulfide, which can inhibit the process. Inhibition of biogas production can cause significant economic losses when operating a biogas plant. The

regulation of the concentration of inhibitors in the reactor should increase stability and efficiency. The decrease in the concentration of ammonia and sulfides during methane fermentation, possibly due to the recirculation of biogas with its cleaning. Given the large volumetric flow rates of gas, the purpose of this study was to assess the feasibility of using this approach to improve the stability and effectiveness of the process. A comparison of the amount of energy that can be obtained from biogas with the amount of energy that is required for the operation of the compressor to reduce the content of ammonia nitrogen to acceptable for operation of the biogas plant level. Main factors controlling the removal of ammonia and hydrogen sulfide is pH, temperature and gas flow. The parameters extraction of the inhibitors restricted by physiological limits of the methanogenic community. The minimum energy consumption of the compressor when removing the ammonium nitrogen is from 41,1% to 233,6%, sulphides – from 0.6% to 4.9% relative to the amount of energy that can be obtained from biogas. Thus, the use of recirculation of the gas phase with its purification to reduce the concentration of ammonia nitrogen is impractical from the point of view of energy consumption, while its use to reduce the concentration of sulfides may be considered as acceptable.

Keywords: chicken manure, methane fermentation, biogas, purification, inhibition, ammonia nitrogen, sulfides

УДК 514.18

АНАЛІТИЧНИЙ ОПИС ІЗОТРОПНИХ ЛІНІЙ НА ПОВЕРХНІ ПСЕВДОСФЕРИ ТА ПОБУДОВА МІНІМАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ

**С. Ф. Пилипака, доктор технічних наук
М. М. Муквич, докторант***

Анотація. У статті здійснено аналітичний опис мінімальних поверхонь за допомогою ізотропних ліній, які лежать на поверхні псевдосфери. Використано запропонований авторами статті метод аналітичного опису мінімальних поверхонь за допомогою ізотропних ліній, які лежать на поверхнях обертання, віднесених до ізометричної сітки координатних ліній. Знайдено аналітичну умову віднесення псевдосфери до ізометричної сітки координатних ліній. Параметричні рівняння сімей ізотропних ліній отримано із умови рівності нулю лінійного елемента псевдосфери, віднесеної до ізометричної сітки координатних ліній. Для

*Науковий консультант – доктор технічних наук С. Ф. Пилипака

© С. Ф. Пилипака, М. М. Муквич, 2016