

WASTE WATER FROM LIVESTOCK FARMS AS A SUBSTRATE FOR ANAEROBIC FERMENTATION

O. Vorontsov

National University of Food Technologies

Key words:

*Sewage treatment
Biogas
Methane digesters
Anaerobic (methane)
fermentation
Fermentation depth
Flows of the livestock
complex*

Article history:

Received 05.09.2016
Received in revised form
23.09.2016
Accepted 20.10.2016

Corresponding author:

O. Vorontsov
E-mail:
ewtcorp@ukr.net

ABSTRACT

The article shows the use of highly concentrated waste water from livestock farms as a substrate for anaerobic microorganisms. Based on laboratory studies on semicontinuous methane fermentation of piggery complex sewage, minimum ($D_{min} = 0.0168 \text{ h}^{-1}$) and maximum ($D_{max} = 0.0042 \text{ h}^{-1}$) dilution rates of continuously operating reactor were set. The process of methane fermentation should take place in a continuous mode and thermophilic conditions ($t = 55 \text{ }^\circ\text{C}$). Purification of effluents in a three-layer loading of biofilter can reduce the COD of the treated liquid to 398 mg O_2/L , corresponding to 178.55 mg O_2/L of the BSK₅ (conversion factor of 0.45). Biogas yield was 5.2 liters per 1 liter of the reactor volume at thermophilic state digestion and the daily loading volume of 10%. Methane concentration in biogas is 64–68% at thermophilic fermentation and 58–62% at mesophilic one. General cleaning effect is 91.6%.

СТІЧНІ ВОДИ ТВАРИННИЦЬКИХ КОМПЛЕКСІВ ЯК СУБСТРАТ ДЛЯ АНАЕРОБНОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ

О.О. Воронцов

Національний університет харчових технологій

У статті показано можливість використання висококонцентрованих стічних вод від тваринницьких комплексів як субстрату для анаеробних мікроорганізмів. На підставі лабораторних досліджень напівбезперервної метанової ферментації стоків свинарського комплексу визначено мінімальну ($D_{min} = 0,0168 \text{ год}^{-1}$) і максимальну ($D_{max} = 0,0042 \text{ год}^{-1}$) швидкості розведення в безперервно діючому реакторі. Процес метанової ферментації повинен проходити в безперервному режимі в термофільних умовах ($t = 55^\circ\text{C}$). Доочищення стоків на біофільтрі з тришаровим завантаженням дає змогу знизити ХСК оброблюваної рідини до 398 мг $\text{O}_2/\text{л}$, що відповідає 178,55 мг $\text{O}_2/\text{л}$ БСК₅ (коефіцієнт перерахунку 0,45). Вихід біогазу становив 5,2 л на 1л об'єму реактора на добу при термофільному режимі зброджування та добовим завантаженням 10% об'єму. Концентрація метану в біогазі становить 64–68% об'єму при термофільному зброджуванні і 58–62% — при мезофільному. Загальний ефект очищення становить 91,6%.

Ключові слова: очищення стічних вод, біогаз, метан, метантенк, анаеробна (метанова) ферментація, глибина зброджування, стоки тваринницького комплексу.

Постановка проблеми. Потреби людства в молочних і м'ясних продуктах вимагають великих обсягів сировини. Технологія вирощування худоби, яка прийнята в даний час на тваринницьких комплексах промислового типу, характеризується високою концентрацією поголів'я, безпідстилковим утриманням тварин, повною механізацією процесів видалення гною з виробничих приміщень, що обумовлює утворення якісно нового виду стічних вод [1].

У складі екскрементів великої рогатої худоби (ВРХ), свиней, курей міститься: 77—88% органічних речовин; 2,4—5,0% жиру; 9,3—42,1% сирого протеїну; 9,6—30% лігніну; 2,3—10,3% азоту; 0,2—2,7% фосфору; 1,0—3,1% калію. Співвідношення $C/N > 6$ (9—15) [2], що є оптимальним для анаеробної ферментації [3]. Хімічний склад стічних вод тваринницьких комплексів залежить від поголів'я, але зі збільшенням кількості тварин не завжди збільшується вміст забруднюючих речовин. Так, біхроматна окислюваність, що дорівнює $19,2 \times 10^3$ мг/л⁻¹, характерна для комплексу на 2 тис. голів ВРХ, в той час як для комплексу ВРХ на 10 тис. голів вона становить $12,9 \times 10^3$ мг/л⁻¹ [4]. Це пов'язано з різним ступенем розбавлення стоків водою для технологічних потреб. За концентрацією органічних і мінеральних солей стоки тваринницьких комплексів у багато разів перевищують як господарсько-побутові, так і промислові, тому є більш серйозними забрудненнями зовнішнього середовища [4; 5].

Сучасний стан вимог до охорони навколишнього середовища вимагає нових рішень щодо знешкодження таких забруднень. Впровадження метанової ферментації дозволить вирішити проблему передочистки «важких» стоків, їх знезараження та подальшої утилізації продуктів, що утворюються при очистці воді.

Мета статті: дослідити можливість і доцільність використання висококонцентрованих стічних вод від тваринницьких комплексів як субстрату для анаеробних мікроорганізмів.

Матеріали і методи дослідження. Як об'єкт дослідження використовували стічні води тваринницького комплексу «Мурманський». Фізико-хімічні та мікробіологічні аналізи проводилися згідно із загальноприйнятими методиками. Для обробки результатів дослідження застосовувалися методи математичної статистики.

Виклад основних результатів дослідження. Збільшення навантаження на екологічне довкілля, нераціональне використання органічних ресурсів змушує суспільство прикладати зусилля для пошуку шляхів зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Стоки тваринницьких комплексів складаються із суміші природних відходів тварин, залишків корму та води. Їх кількісна та якісна характеристики залежать від віку, виду поголів'я, способів утримання, від прийнятої системи прибирання гною з виробничих приміщень, виду кормів та інших факторів.

Сеча, яка перебуває у стоках, обумовлює наявність у них азотовмісних сполук, таких як сечовина і сечова кислота. Вміст сечовини коливається від

1500 до 7200 мг/л [6]. Із зольних елементів із сечею надходить значна кількість калію. Сполуки фосфору і білковий азот надходять у стоки з твердими виділеннями [7]. Склад гнойових стоків некоректно характеризувати середніми показниками, тому що він змінюється в широких межах (табл. 1). Показники забруднень (БСК, ХСК, завислі речовини, сухий залишок тощо) особливо високі для гною, неподіленого на тверду і рідку фракції; рідка фракція характеризується більш низькими показниками забруднень.

Тваринницькі стічні води характеризуються високим бактеріальним забрудненням. Забрудненість стоків великої рогатої худоби по колі-титру становить 10^{-5} — 10^{-7} , за титром ентерококів — 10^{-3} — 10^{-5} , за загальною мікробною забрудненістю в середньому 10—20 яець гельмінтів у літрі [2]. Тваринницькі стоки можуть бути факторами передачі понад 100 інфекційних захворювань. Епідеміологічна небезпека полягає не тільки в кількості патогенних мікроорганізмів, але й у тривалих термінах виживання останніх. За даними дослідників [12], поряд із значним забрудненням органічними речовинами тваринницькі стоки також характеризуються високою мінералізацією — 5,9 г/л. Серед мінеральних речовин переважають гідрокарбонати — 3203 мг/л, хлориди — 696 мг/л, кальцій — 549 мг/л, натрій — 425 мг/л. З цієї причини тваринницькі комплекси є більш небезпечними джерелами забруднення навколишнього середовища, ніж промислові стоки.

Таблиця 1. Фізико-хімічний склад стічних вод тваринницьких комплексів

Показники	[5]	[2]	[3]	[4]	[14]	[7]
pH	6,0—7	7,7—8,1	8—9	7,8	7,1—8,1	6,6
Завислі речовини, мг/л ⁻¹	1 232—8 600	5 000—12 000	17 856	-	8 000—39 600	14 800
Сухий залишок, мг/л ⁻¹	3 700—5 000	-	-	8 200	10 500—13 500	18 100
БСК ₅ , мг O ₂ /л ⁻¹	1 800—9 200	3 000—20 000	4 500	-	64 00—23 600	14 200
ХСК, мгO ₂ /л ⁻¹	5 892—11 696	4 000—24 000	10 685	-	7 600—40 000	17 700
Загальний азот, мг/л ⁻¹	1 300—3 884	1 143	-	3 700	1 700—4 370	2 580
Амонійний азот, мг/л ⁻¹	1 400—2 690	400—500	500	1 900	430—900	-
Сечовина, мг/л ⁻¹	-	-	-	-	1 500—7 200	-
Фосфати, мг/л ⁻¹	155	2500	-	-	800	-
Хлориди, мг/л ⁻¹	122—930	150	1 550	-	140—600	-
Карбонати, мг/л ⁻¹	-	-	-	-	1560—2160	-
Колі-титр	-	10^{-5} — 10^{-7}	-	-	-	10^{-10}
КУО/мл	-	$8,0 \cdot 10^7$	-	-	-	$2 \cdot 10^9$ — $53 \cdot 10^{10}$

У стоках тваринницьких комплексів міститься багато невикористаних поживних речовин і мікробної біомаси, тому що з організму виділяється 20% неперероблених поживних речовин. Бактеріальна біомаса, яка утворюється в

процесі розщеплення кормів, містить 50—60% протеїну. Все це виділяється з організму і накопичується в гної [13]. За даними [4; 5], при скиданні у водойми стоки тваринницьких комплексів повинні відповідати таким показникам: $BCK_5 \leq 20 \text{ мгO}_2/\text{л}^{-1}$, $XCK \leq 100 \text{ мгO}_2/\text{л}^{-1}$, завислі речовини $\leq 20 \text{ мг/л}^{-1}$, фосфати $\leq 0,5 \text{ мг/л}^{-1}$.

Очищення, знезараження й утилізація стоків тваринницьких комплексів стала справою першорядної важливості. Не вирішивши її, не можна будувати великі тваринницькі комплекси на промисловій основі.

Існуючі схеми очищення концентрованих стічних вод і шляхи використання очищеної води. Стічні води тваринницьких комплексів з вирощування великої рогатої худоби та свиней поділяються на такі види: гнойові (рідкий гній), виробничі (забруднені і незабруднені), дощові (забруднені і малозабруднені) та побутові. Як правило, для цих стоків приймають роздільну систему каналізації з наявністю мереж гнойових з високою концентрацією забруднень (високозабруднених), виробничо-побутових і дощових стічних вод з низькими концентраціями забруднень (малозабруднених).

На сьогодні [1;14] найбільш поширені три основних способи обробки й утилізації рідкого гною:

- природна біохімічна очистка шляхом тривалого витримування стоків у відстійниках-накопичувачах (гноєсховищах) з подальшим використанням на землеробських полях зрошення (ЗПЗ);
- штучна біохімічна очистка;
- переробка рідкого гною шляхом приготування компосту.

Перша схема використовується на комплексах для вирощування великої рогатої худоби невеликої продуктивності — до 400—800 голів на рік; друга схема використовується для комплексів будь-якої продуктивності. Гноєсховища застосовуються для природного знезараження і дегельмінтизації стоків; час витримування становить 6—7 місяців. Тверда фракція гною (вологістю 80%) при біотермічній обробці в буртах влітку витримується 1 місяць, а взимку — 2 місяці. Однак все це не забезпечує повної екологічної безпеки при використанні обробленого гною на ЗПЗ.

Природна біохімічна обробка стоків свинарського комплексу здійснюється за тим же принципом, що й обробка стоків комплексів ВРХ великої продуктивності.

При штучній біохімічній обробці передбачається використання аеротенків як основної стадії обробки стоків. Проте використання аеротенків з подовженою аерацією вимагає значних енерговитрат, доочищення в біоставках та обробки озоном для знезараження. Це дозволяє використовувати цю воду для змиву гною.

Концентрація біогенних і органічних речовин після очищення за вищевказаними схемами досить висока, що не дозволяє скидати їх у водойми. Доочищення проводиться на полях зрошення і полях фільтрації.

В основі перерахованих способів переробки й утилізації рідкого гною лежить його поділ на фракції з подальшою роздільною обробкою рідкої (вологістю до 98%) і твердої (вологістю — 65—80%) фракцій. У зарубіжній практиці також застосовуються зазначені способи переробки гною [8; 9].

Проте використання стоків тваринництва на ЗПЗ, штучна біохімічна (аеробна) обробка і компостування не дають можливості використовувати весь запас речовин, який міститься в стоках даної категорії.

Наявність ентеропатогенних серотипів колі, високе мікробне забруднення, низький колі-титр (10^{-6}) після двоступеневої біохімічної очистки з подальшим витримуванням в ставках-накопичувачах вказують на необхідність введення додаткового очищення стічних вод або використання метанової ферментації як етапу перед очищенням і знезараженням. Термофільне метанове зброджування тваринницьких стічних вод, зокрема гною, є одним із найбільш перевірених способів знезараження від яєць гельмінтів, патогенної мікрофлори і насіння бур'янів [11].

Процес анаеробної ферментації використовується для обробки високо- і низькоконцентрованих (наприклад, міських) стічних вод, при цьому вирішуються дві проблеми: охорона навколишнього середовища й отримання енергії [12].

Спосіб обробки рідкого гною шляхом керованого анаеробного процесу з отриманням метану не знаходить широкого застосування, тому що метанотворюючі бактерії вимагають чітко визначених умов (рН, температура, постійний склад субстрату, перемішування). У вітчизняній практиці застосування метантенків рекомендується при чисельності поголів'я більше 300 і вологості гною 86—93% [8].

У ФРН працює великий завод з отримання метану і добрив шляхом анаеробного зброджування відходів тваринництва [8]. В Індії завершені дослідження, в результаті яких розроблено оптимальні конструкції і принципи роботи установок для переробки коров'ячого гною. За кордоном проводяться розробки нових конструкцій метантенків [10]. Розроблено біотехнології «Biorplex» [11], «Anamt» [12] для очищення стічних вод мікробіологічної та харчової промисловості, «Anax» [8] — для стічних вод цукрових і спиртозаводів, тваринницьких комплексів тощо, що включають як попередню стадію очищення метанове зброджування, подальше доочищення здійснюється різноманітними способами. Розроблена у Франції система «Anax» для переробки відходів тваринницьких ферм повністю забезпечує себе енергією за рахунок метану, одержаного в процесі обробки відходів. Крім того, отримують воду, придатну для господарських цілей, і органічне добриво. Дослідна установка вартістю 300 тис. євро, що працює у Франції, може щодня переробляти 1200 м³ відходів тваринницьких ферм. Термін окупності установки — 3 роки. У системі «Anax» відходи збираються у великий резервуар і перекачуються у метантенк об'ємом 1 500 м³ для зброджування. При перекачуванні відходи очищуються на фільтрі з великої сітки від шматків дерева, цегли тощо, які можуть викликати механічні пошкодження установки. При зброджуванні відходів відбувається виділення великої кількості метану, що використовується для забезпечення установки енергією. Зброджування відходів триває 10—15 діб, протягом яких їх забрудненість зменшується на 90—95%. Далі відходи перекачуються у відстійник, де відбувається поділ рідкої і твердої фракцій. Рідина перекачується в резервуар, де вона піддається хімічній та електролітичній обробці, каталітичному окисленню, обробляється озоном і

фільтрується. Після обробки вода придатна для будь-яких господарських потреб. Тверда фракція зневоднюється під пресом, в результаті чого отримується сухе органічне добриво зі слабким запахом, що містять 40% твердих частинок.

Центральною експериментальною лабораторією гідромеханізації сільсько-господарських процесів запропонована схема установки [4], що дозволяє проводити безперервне анаеробне метанове бродіння в потоці. Установка для знезараження гною включає такі вузли: теплообмінник, змішувач-подрібнювач, приймач маси для ферментації, метантенк, поглинач (сіркоочищення), газгольдер, бойлер, контактний нагрівач, повітродувку, насос для гарячої води і три фекальних насоси.

Робота установки для термофільного знезараження гною здійснюється таким чином: екскременти тварин, призначені для знезараження, подаються в змішувач-подрібнювач, де і відбувається їх ретельне перемішування і подрібнення сторонніх включень. Сюди ж вноситься певна доза раніше збродженого гною, що містить анаеробні бактерії. Отримана суміш зі свіжих екскрементів і збродженого гною фекальних насосом подається в теплообмінник, де підігрівається за рахунок контакту із зустрічним потоком збродженої маси, а потім надходить для остаточного знезараження в метантенк. Зброджена маса вивантажується за допомогою фекального насоса в гноєсховище або використовується (після поділу на фракції і відповідної підготовки) як добриво. Ще раз підкреслимо необхідність відповідної підготовки (доочистки) тваринницьких стічних вод перед використанням для зрошення кормових культур. Варто зауважити, що таке доочищення необхідне перед скиданням їх у водойму або поверненням у виробництво.

Очищення промислових стічних вод за допомогою метанового бродіння застосовується для попередньої обробки концентрованих стічних вод підприємств первинної обробки вовни, заводів з виробництва деревноволокнистих плит, дріжджових заводів, заводів із виробництва синтетичних жирних кислот, заводів із виробництва капролактаму, заводів із виробництва спирту, м'ясокомбінатів. Ступінь зниження БСК після очищення стоків висока і становить 75—96%. За даними зарубіжних авторів [8; 9], в процесі метанового бродіння концентрованих стічних вод досягається глибинне збродження по ХСК — 80—95%, по БСК₅ — 50—95%. Біогаз, що утворюється, дозволяє на 20—80% покрити енерговитрати. Тривалість збродження коливається від 0,5 до 30 діб: для обробки стічних вод ВРХ — 5 діб, свиней — 3—4 доби, картопляного лушпиння — 3 доби.

Промислове отримання біогазу з органічних відходів має ряд переваг:

- відбувається ефективне очищення стічних вод, особливо тваринницьких і господарсько-побутових, знищуються яйця гельмінтів, патогенна мікрофлора та насіння бур'янів, знижується вміст органічних речовин (до 10 раз) після перетворенням їх у біогаз;

- анаеробна переробка відходів тваринництва, рослинництва, активного мулу призводить до мінералізації азоту і фосфору та їх збереження, на відміну від традиційних способів приготування органічних добрив методом компостування, при якому втрачається до 30—40% азоту;

- при метановому бродінні к.к.д. перетворення органічних речовин у біогаз досягає 80—90%;
- біогаз можна з високою ефективністю використовувати як паливо або трансформувати в теплову й електричну енергію;
- створення біогазових установок, зважаючи на їх локальне розміщення поблизу підприємств і побутових приміщень, не вимагає будівництва дорогих газопроводів [14].

Таким чином, анаеробна обробка органічних відходів дозволяє вирішити одночасно екологічну й енергетичну проблеми і одночасно сприяти отриманню добрив для органічного землеробства. Однак попередньо очищені стічні води необхідно доочистити до показників, що дозволяють скидання їх у водойми, для зрошення сільськогосподарських культур або повернення у виробництво. Для очищення й доочищення концентрованих стічних вод можливе застосування біофільтра [10]. У біофільтрі стічна рідина обтікає поверхню завантажувального матеріалу, покритого біоплівкою, яка утворюється колоніями мікроорганізмів. Проходячи через завантажувальний матеріал, вода із залишковими забрудненнями залишає на ньому нерозчинені домішки, колоїдні і розчинені органічні речовини. Останні сорбуються на біоплівці, що покриває поверхню завантажувального матеріалу. Мікроорганізми, що утворюють біоплівку, окислюють органічні речовини, використовуючи їх як джерело живлення і енергії.

Необхідної глибини очищення стічних вод можна досягти застосуванням ступінчастої обробки з використанням різних біоценозів мікроорганізмів. При цьому створюється можливість розкладання метаболітів кожного попереднього ступеня очищення.

Обґрунтування та вибір технологічної схеми очищення стічних вод свинарських комплексів і птахоферм. Концентровані стічні води цих комплексів є готовим живильним середовищем для росту, розвитку і життєдіяльності різних мікроорганізмів (ацетогенних, амонійфіксуючих, метанотворюючих бактерій), оскільки містять усі необхідні компоненти, вітаміни та мікроелементи. Використання біотехнологічних методів очищення, заснованих на застосуванні анаеробних і аеробних мікроорганізмів, є більш перспективним порівняно з фізико-хімічною і природною біологічною обробкою. Біохімічні перетворення органічних компонентів субстрату під впливом мікроорганізмів є практично безвідходними процесами і не забруднюють навколишнє середовище. У процесі анаеробної ферментації утворюються попередньо очищена вода, надлишкова біомаса мікроорганізмів і біогаз; в процесі аеробної ферментації — надлишкова біомаса мікроорганізмів/активний мул/очищена вода. Все це може знайти подальше застосування як джерело енергії, палива, добрив і білково-вітамінних додатків для годування тварин.

У практиці очищення стічних вод прийнято вважати, що при співвідношенні БСК/ХСК > 0,5 необхідно застосовувати біохімічні методи очищення [10]. Для тваринницьких стоків, за усередненими даними, БСК/ХСК в основному перевищує цей показник. Згідно з рекомендаціями СНіП, вміст азоту і фосфору має перебувати в пропорції БСК:N:P = 100:50:1. Для стоків

тваринницьких комплексів це становить при нижній межі значень 100:37:0,9; при верхній межі значень — 100:58,6:0,45. Тобто стічні води тваринницьких комплексів придатні для біохімічної очистки.

Свинарський комплекс «Арктика» скидає за добу 200—250 м³ гідрозмивного гною з БСК 6 000—7 000 мгО₂/л. Очисні споруди для обробки свинарських стоків відсутні, що порушує екологічну рівновагу в даному регіоні. Особливо велика шкода завдається біоценозам водної акваторії. Для зниження концентрації органічних забруднень вуглецем доцільно використовувати метанову ферментацію на стадії попередньої обробки стоків з подальшою їх очисткою в аеротенках. Слід враховувати, що в процесі анаеробної ферментації вміст амонійного азоту буде збільшуватися, а в процесі аеробної ферментації зменшуватися, перетворюючись на нітритні і нітратні форми. Промислове використання термофільної метанової ферментації як ступеня перед очищенням для обробки стоків свинарських комплексів має ряд переваг:

- суттєве зниження загальної забрудненості стічної рідини, яка надходить на аеробне очищення;
- при анаеробній переробці відходів тваринництва відбувається мінералізація азоту і фосфору — основних складових добрив, їх збереження на відміну від традиційних способів приготування органічних добрив методом компостування, при якому втрачається до 30—40% азоту;
- знищення патогенної мікрофлори, яєць гельмінтів і насіння бур'янів;
- отримання значної кількості біогазу. К.к.д. перетворення органічних речовин в біогаз становить 80—90%;
- можливість підтримання достатньої температури рідини в аеротенках в зимовий час за рахунок її підігріву в метантенках, що особливо важливо в умовах Заполяр'я;
- створення біогазових установок, зважаючи на їх локальне розміщення, не вимагає будівництва газогону;
- виключення необхідності складування надлишкового активного мулу аеротенків, який зброджується в метантенку.

Запропонована схема передбачає включення в технологію очищення стоків метантенків об'ємом 1000 м³, що призначені для зброджування органічних відходів та отримання біогазу.

Очищення в аеротенках стоків, що пройшли попереднє очищення в метантенках, не є дуже важким завданням, проте для спуску у водойму або повернення очищеної води на технологічні потреби воду, оброблену за анаеробно-аеробною технологією, необхідно доочишувати.

Для доочистки стоків у даний час застосовуються біологічні фільтри [15]. У біофільтрі стічна рідина обтікає поверхню завантажувального матеріалу, покритого біоплівкою, що утворюється колоніями мікроорганізмів. Проходячи через завантажувальний матеріал, вода із залишковими забрудненнями залишає на ньому нерозчинні домішки, колоїдні і розчинені речовини. Останні сорбуються біоплівкою, що покриває поверхню завантажувального матеріалу. Мікроорганізми, що утворюють біоплівку, окислюють органічні речовини, використовуючи їх як джерело живлення і енергії.

Ефективність методів очищення і доочищення залежить не тільки від того, наскільки обґрунтований той чи інший спосіб, але також від сукупності виробничих характеристик, що впливають на склад стічних вод, які надходять на очистку (якості очищення на попередніх стадіях, конструкції застосованих установок та інших факторів). Необхідної глибини очищення можна досягти шляхом застосування ступінчастої обробки з використанням різних біоценозів мікроорганізмів. При цьому створюється можливість розкладання метаболітів кожного попереднього ступеня очищення.

Дослідження складу стічних вод свинарського комплексу. Стічні води свинарського комплексу характеризуються такими показниками забруднень: рН — 7,5—7,9; ХСК — 6—8 гО₂/л, ЛЖК — 0,6—0,92 г/л. Стоки містять значну концентрацію органічних і мінеральних забруднень.

На підставі аналізу науково-дослідної, технічної літератури, експериментальних досліджень метанової ферментації стоків із забрудненнями природного походження розроблено технологічну схему очищення стоків.

Контроль за якістю анаеробно-аеробного очищення концентрованих стічних вод здійснювався за такими показниками, як ХСК (хімічне споживання кисню) БСК₅ (п'ятидобове біохімічне споживання кисню), вміст завислих речовин, рН, концентрація амонійного азоту тощо згідно зі стандартними уніфікованими методиками.

В основу технології очищення концентрованих стоків свинарського комплексу покладено метод, сутність якого зводиться до вилучення органічних компонентів субстрату. Останні є гарним поживним середовищем для мікроорганізмів, оскільки містять усі біогенні елементи, макроелементи, мінеральні солі і не містять ксенобіотиків.

Запропонована технологія передбачає такі стадії процесу очищення:

- усереднення;
- метанову ферментацію як ступінь попередньої очистки;
- аеробну ферментацію як основний ступінь очищення;
- біологічну фільтрацію як ступінь доочищення.

Процес метанового бродіння здійснюється біоценозом різних мікроорганізмів, в основному, анаеробних, і передбачає три стадії:

- розпад складних органічних сполук до низькомолекулярних речовин (вуглеводів, органічних кислот тощо);
- утворення з отриманих низькомолекулярних сполук нижчих жирних кислот (оцтової, пропіонової, мурашиної), одноатомних спиртів, водню, окису вуглецю, вуглекислого газу; утворення метану.

Існують два шляхи утворення метану:

- трансформація оцтової кислоти: $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$;
- відновлення діоксиду вуглецю: $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.

Метанове бродіння здійснюється в герметичному ферментері-метантенку, який являє собою ємність об'ємом 6 л, обладнану мішалкою і вміщену в термостат для підтримання необхідної температури бродіння. Вихідна стічна вода тваринницького комплексу направляється в метантенк. Два рази на добу через воронку за допомогою вентиля в метантенк додавали стічну рідину, а через шланг за допомогою вентиля відводили очищену воду. За допомогою

мішалок вміст метантенка через кожні дві години перемішувався. Газ по гумовій трубці надходив в посудину із замикаючою рідиною.

Дослідження режимів метанового бродіння. Процес метанового бродіння здійснювали напівбезперервним (від'ємно-доливним методом) у мезофільних (30—35 °С) і термофільних (50—55 °С) умовах. Коефіцієнт заповнення метантенка становив 0,85%. Швидкість розбавлення становила 0,0042 ч⁻¹, 0,0084 ч⁻¹ і 0,0168 ч⁻¹, що відповідало 10, 20 і 40% дозам завантаження до обсягу зароджуваної рідини. При зменшенні швидкості розведення збільшувався час перебування і зменшувалася продуктивність біогазу.

Початково метантенк завантажували збродженим осадом очисних споруд Бортницької станції аерації, обсяг «затравки» становив 2% від робочого об'єму метантенка. Концентрація активного мулу в метантенку становила 15—30 г/л. Адаптація мікроорганізмів активного мулу до даного субстрату тривала до початку виділення біогазу. Після чого в метантенку із заданою швидкістю подавалася стічна вода.

Склад вихідних і очищених стоків наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Склад вихідних і очищених стоків

№	Показники, одиниці виміру	Мезофільний режим						Термофільний режим					
		завантаж. 10%		завантаж. 20%		завантаж. 40%		завантаж. 10%		завантаж. 20%		завантаж. 40%	
		вих.	кін.	вих.	кін.	вих.	кін.	вих.	кін.	вих.	кін.	вих.	кін.
1	pH	7,3	7,9	7,8	7,9	7,6	7,7	7,8	7,8	7,8	7,8	7,6	7,6
2	БСК ₅ , гО ₂ /л	2,8	0,67	4,2	1,0	4,0	0,85	2,80	0,6	4,2	0,6	4,0	0,7
3	ХСК, гО ₂ /л	6,0	1,7	8,0	1,5	7,2	1,2	6,0	0,8	8,0	1,0	7,2	0,6
4	ЛЖЛ, г/л	0,6	0,49	0,92	0,47	0,8	0,3	0,6	0,3	0,92	0,6	0,85	0,4
5	Газ, л/суг	-	2,5	-	3,2	-	5,2	-	4,6	-	4,9	-	5,0

У результаті життєдіяльності мікрофлори метантенків поживні компоненти, що містяться в стічній воді, перетворюються в біологічно активні речовини та біогаз.

Хімічний склад активного мулу метантенків представлений у табл. 3.

Таблиця 3. Хімічний склад мікробної біомаси активного мулу метантенків

№	Компоненти	У перерахунку на С.Р.,%
1	Сирий протеїн	45,0—47,0
2	Істиний протеїн	40,0—43,0
3	Амінокислоти	21,5—24,5
4	Зола	30,0
5	Жир	2,7—4,2
6	Вітамін В12 37,4 мкг/г	37,4 мкг/г

Отримані дані свідчать про те, що біомаса активного мулу є повноцінною за вмістом білків, жирів, а також за амінокислотним і вітамінним складом.

Біогаз, що утворюється в процесі метанового бродіння, містить в середньому 60—65% метану і 35—40% вуглекислого газу. Теплотворна здатність біогазу, що утворюється в процесі метанового бродіння тваринницьких

стоків, наближається до теплотворної здатності метану природного походження і становить 4700 ккал/м³.

У табл. 4 наведено якісний склад біогазу, що утворюється в процесі метанової ферментації.

Таблиця 4. Якісний склад біогазу

№	Показники	Температурні режими	
		Термофільний % об'єму	Мезофільний % об'єму
1	Метан	64,0—68,0	58,0—62,0
2	Диоксид вуглецю	36,0—40,0	42,0—46,0
3	Водень	0,0	0,5
4	Окис азоту	0,0	0,0
5	Сірководень	0,0	0,0

У процесі метанового бродіння також визначали зброджування субстрату, швидкість вилучення забруднень, вихід біогазу.

Глибина зброджування, ступінь використання субстрату визначається за формулою:

$$E = \frac{S_0 - S_t}{S_0},$$

де S_0 — вихідна концентрація субстрату, г/л; S_t — концентрація субстрату в момент відбору проби, г/л.

Причому максимальна глибина зброджування в кожному конкретному випадку залежала від співвідношення білків, жирів і вуглеводів у субстраті.

Максимальна продуктивність може бути визначена з умови:

$$\frac{E}{\tau} \rightarrow \max,$$

де E — глибина зброджування по ХСК, БСК₅, вуглецю тощо, яка залежить від швидкості розведення:

$$D = \frac{1}{\tau}.$$

Швидкість вилучення забруднень (N) корелюється зі швидкістю розведення співвідношенням:

$$N = D \cdot S,$$

де τ — час перебування рідини в метантенку; S_0 — вхідна концентрація субстрату; S_t — концентрація субстрату в момент відбору проби; D — швидкість розведення, ч⁻¹.

Вихід біогазу, або зняття з одиниці забруднень, визначається за формулою:

$$PV^{газ} = \frac{F}{V(S_0 - S_t\tau)} \cdot D,$$

де F — вихід газу, л/добу; V — робочий об'єм метантенка, л.

Для порівняльного аналізу режимів роботи анаеробних реакторів на практиці часто використовують показник швидкості газоутворення $PP^{газ}$:

$$PP^{газ} = \frac{F \cdot \rho}{V(S_0 - S\tau) \cdot D},$$

де ρ — щільність біогазу, яка складає 1,15 г/л.

У табл. 5, 6 наведено основні показники глибини зброджування субстрату по ХСК, БСК₅ при різних завантаженнях і температурних режимах. Наведені розрахунки й експериментальні дані свідчать про те, що глибина зброджування субстрату та вихід біогазів залежать від швидкості розведення і температурних умов. У мезофільних умовах глибина зброджування по ХСК становить 81—83%, по БСК₅ — 76%, у термофільних умовах глибина зброджування по ХСК збільшується до 87—88% і по БСК₅ — до 86%.

Таблиця 5. Показники процесу зброджування субстрату в метантенках

№	Показники	Размірність	Мезофільний режим					
			Завант., 10%		Завант., 20%		Завант., 40%	
			по ХСК	по БСК	по ХСК	по БСК	по ХСК	по БСК
1	Глибина зброджування	Е	0,83	0,76	0,81	0,76	0,83	0,76
2	Швидкість вилучення забруднень	Н, г/л. год	0,021	0,009	0,055	0,027	0,100	0,053
3	Питома швидкість газоутворюв.	ІРГаз, г/г	1,20	2,86	0,83	1,00	0,49	0,34
4	Вихід біогазу з од. забруднень	ІРГаз, л/г	1,04	2,71	0,48	0,36	0,73	0,82

Таблиця 6. Показники процесу зброджування субстрату в метантенках

№	Показники	Размірність	Термофільний режим					
			Завант., 10%		Завант., 20%		Завант., 40%	
			по ХСК	по БСК	по ХСК	по БСК	по ХСК	по БСК
1	Глибина зброджування	Е	0,87	0,78	0,87	0,86	0,88	0,82
2	Швидкість вилучення забруднень	Н, г/л. час	0,022	0,019	0,056	0,038	0,110	0,158
3	Питома швидкість газоутворюв.	ІРГаз, г/г	2,30	4,83	0,80	1,56	0,46	0,46
4	Вихід біогазу з од. забруднень	ІРГаз, л/г	1,76	4,30	0,70	1,86	0,40	0,39

У процесі метанового бродіння стічних вод свиначства утворюється до 5 об'ємів біогазу на 1 об'єм стоків, у складі якого міститься в середньому 64% метану. Концентрація речовин в результаті бродіння знижується з 2—4% до 0,5—1,0% по сухим речовинам. Отже, на кожні 15—30 кг зброджених речовин утворюється 3,2 м³ чистого метану.

Для очищення свиначських стоків доцільно використовувати термофільну метанову ферментацію. У лабораторних умовах управління процесом метанової ферментації здійснювалося регулюванням швидкості розведення субстрату, а також підтриманням необхідного температурного режиму.

Висновки

На підставі лабораторних досліджень напівбезперервної метанової ферментації стоків свинарського комплексу визначено мінімальну ($D_{\min} = 0,0168 \text{ ч}^{-1}$) і максимальну ($D_{\max} = 0,0042 \text{ ч}^{-1}$) швидкості розведення в безперервно діючому реакторі. Процес метанової ферментації повинен проходити в безперервному режимі в термофільних умовах ($t = 55 \text{ }^\circ\text{C}$). Вологість зброженого осаду в метантенку повинна становити 92—98%.

Встановлено час аерації для очищення свинарських стоків (3 год). Подовжена аерація необхідна для більш глибокого вилучення забруднень, досягнення кращого значення валового індексу, зниження кольоровості оброблюваного стоку. Для цього передбачені два ступені аеротенків. В аеротенк 1-го ступеня повинні надходити стоки з ХСК не більше 900 мг O_2 /л, вмістом ЛЖК не більше 10 мг-екв/л, лужність стоку не менше 60 мг-екв/л. В аеротенк 2-го ступеня повинні надходити стоки з ХПК не більше 700 мг O_2 /л.

Доочищення стоків на біофільтрі з тришаровим завантаженням дозволяє знизити ХСК оброблюваної рідини до 398 мг O_2 /л, що відповідає 178,55 мг O_2 /л БСК₅ (коефіцієнт перерахунку 0,45).

Загальний ефект очищення (вихід біогазу) становив 5,2 л на 1л об'єму реактора на добу при термофільному режимі зброджування та добовим завантаженням 10% об'єму.

Концентрація метану в біогазі становить 64—68% об'єму при термофільному зброджуванні і 62% — при мезофільному.

Отримані дані доводять доцільність застосування даної технологічної схеми для очищення свинарських стоків і отримання біогазу. Для досягнення значень ХСК, відповідних нормам скидання у водойми, стоки рекомендується піддавати додатковій обробці на насосно-фільтрувальних станціях з подальшим озонуванням або впливом низькотемпературної плазми.

Література

1. *Савицький В.М.* Відходи виробництва і споживання та їх вплив на ґрунти і природні води: Навчальний посібник / В.М. Савицький, В.К. Хільчевський, О.В. Чунарьов // За ред. В.К. Хільчевського. — Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. — 152 с.
2. *Мироненко М.И.* Санитарная охрана внешней среды в районах промышленно-животноводческих комплексов / М.И. Мироненко, И.Ф. Ярмолик, А.В. Коваленко. — Москва: Медицина, 1978. — 160 с.
3. Характеристика сточных вод животноводческих комплексов и их роль в загрязнении природных вод. Обзор литературы. Гидрохимические материалы. Формирование и характеристика химического состава природных вод, методы их использования. — Москва: Гидрометеиздат, 1984. — П.97. — С. 100—119.
4. Крупные животноводческие комплексы и охрана окружающей среды (Под редакцией Д.П. Никитина). — Москва: Медицина, 1980. — 225с.
5. *Дисканенко А.П.* Гигиеническая оценка методов очистки природных и сточных вод / А.П. Дисканенко, Г.И. Пономарева, Г.В. Меренюк. — Кишинев. 1985. — С. 41—45.
6. Канализация населенных мест и промышленных предприятий. Под редакцией В.Н. Самохина. — Москва: Стройиздат, 1981. — 639с.
7. *Дубровский В.С.* Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов / В.С. Дубровский, У.Э. Виестур. — Рига: Зинатне, 1988. — 474 с.

8. *Braun R.* Anacrobic pretreatment of industrial wastewater II Eur. Congr. Diotechnol. — Munchen 10—14 sept. weihem.a. — 1984. — Vol. 3. — P. 104—114.
9. *Hughes D.E.* Possibilities in the future handling of food wastes // End. Recoi. — 1979. — P. 10—12.
10. *Никитин Г.А.* Биохимические основы микробиологических производств. — Киев. Высшая школа, 1984. — 343 с.
11. *Цыганков С.П.* Утилизация сточных вод агропромышленных предприятий / С.П. Цыганков // Биотехнология. — 1987. — № 3. — С. 402—403.
12. *Пачухова Е.С.* Технологическая биоэнергетика / Е.С. Пачухова, Н.В. Березин // Биотехнология. — 1986. — № 2. — С. 1—12.
13. *Никитин Г.А.* Метановое брожение в биотехнологии / Г.А. Никитин. — Киев: Высшая школа, 1990. — 108 с.
14. *Яковлев С.В.* Канализация / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, А.И. Жуков. — Москва: Стройиздат, 1975. — 632 с.
15. *Колесников В.П.* Современное развитие технологических процессов очистки сточных вод в комбинированных сооружениях / В.П. Колесников, Е.В. Вильсон. — Под ред. академика ЖКХ РФ В.К. Гордеева-Гаврикова. — Ростов-на Дону: «Изд-во «Юг», 2005. — 212 с.

СТОЧНЫЕ ВОДЫ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ КАК СУБСТРАТ ДЛЯ АНАЭРОБНОЙ ФЕРМЕНТАЦИИ

О.О. Воронцов

Национальный университет пищевых технологий

В статье показана возможность использования высококонцентрированных сточных вод от животноводческих комплексов в качестве субстрата для анаэробных микроорганизмов. На основании лабораторных исследований полунепрерывной метановой ферментации стоков свиноводческого комплекса определены минимальная ($D_{\min} = 0,0168 \text{ ч}^{-1}$) и максимальная ($D_{\max} = 0,0042 \text{ ч}^{-1}$) скорости разведения в непрерывно действующем реакторе. Процесс метановой ферментации должен проходить в непрерывном режиме в термофильных условиях ($t = 55 \text{ }^\circ\text{C}$). Доочистка стоков на биофильтре с трехслойной загрузкой позволяет снизить ХПК обрабатываемой жидкости до 398 мг $\text{O}_2/\text{л}$, что соответствует 178,55 мг $\text{O}_2/\text{л}$ БПК5 (коэффициент пересчета 0,45). Выход биогаза составил 5,2 л на 1 л объема реактора в сутки при термофильном режиме сбраживания и суточной загрузке 10% объема. Концентрация метана в биогазе составляет 64—68% объема при термофильном сбраживании и 58—62% — при мезофильном. Общций эффект очистки составляет 91,6%.

Ключевые слова: *очистка сточных вод, биогаз, метан, метантенк, анаэробная (метановая) ферментация, глубина сбраживания, стоки животноводческого комплекса.*