

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра технологічних процесів та обладнання переробних і харчових
виробництв

Допущений до захисту:
Заст. завідувача кафедри
к.т.н., доцент Труханська О.О.

(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)
«___» 2021 р.

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АНАЕРОБНОЇ ПЕРЕРОБКИ
ГНОЙОВИХ СТОКІВ НА СВИНОФЕРМАХ**

Робота на здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти за
спеціальністю 208 Агроінженерія

Виконав: студент групи 6-МП
Черниш Микола Васильович

Керівник: д.т.н., професор
Булгаков Володимир Михайлович

Вінниця - 2021

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет Кафедра технологічних процесів та обладнання
переробних і харчових виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. завідувача кафедри
к.т.н., доцент Труханська О.О.

“ _____ ” _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

студенту Черниш Микола Васильович.

на тему

«Підвищення ефективності анаеробної переробки гнойових стоків на свинофермах».

затверджену Наказом від 2021 року № _____.

Вихідні дані для підготовки роботи:

1. Методичні вказівки з виконання магістерської роботи.
2. План-проспект магістерської роботи.
3. Підручники і навчально-методичні посібники, статистичні дані.
4. Наукові видання (монографії, книги, збірники, журнали, методики, матеріали ЦНТИ).
5. Методика економічної оцінки результатів досліджень.
6. Дані власних досліджень, одержаних в попередній період.

Календарний план виконання магістерської роботи

Структура роботи		Обсяг стор.	Термін підготовки	Підпис керівника
Анотація		2	Березень 2021 року	
Вступ		2	Березень 2021 року	
Розділ 1	СТАН ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	25	Квітень 2021 року	
Розділ 2	ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	13	Квітень 2021 року	
Розділ 3	МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	17	Липень 2021 року	
Розділ 4	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	23	Серпень - Вересень 2021 року	
Висновки		1	Жовтень 2021 року	
Список використаної літератури		5	Жовтень 2021 року	

Термін подання роботи на кафедру

для попереднього захисту «___»_____ 2021 р.

Завдання видано «___»_____ 2021 р.

Завдання прийняв до виконання _____ М.В. Черниш

Керівник _____ В.М. Булгаков д.т.н., професор
(підпис)

Анотація

Черниш Микола Васильович «Підвищення ефективності анаеробної переробки гнойових стоків на свинофермах» – рукопис. Магістерська робота виконана на кафедрі – «Технологічні процеси та обладнання переробних і харчових виробництв», у Вінницькому національному аграрному університеті, Вінниця 2021 р.

В магістерській роботі розроблена гідравлічна модель анаеробного фільтру з циклічним обуренням за рахунок зміни швидкості руху, вільної поверхні рідини. Для вирішення даних завдань розроблена нова технологія переробки рідкого свинячого гною із застосуванням анаеробного фільтру з сифоновим відведенням. Встановлена функціональна залежність швидкості руху вільної поверхні стоків у фільтрі.

Ключові слова: гнойові стоки, анаеробний фільтр, біогаз, органічні добрива, гідравлічна модель.

Annotation

Chernysh Mykola "Improving the efficiency of anaerobic processing of manure effluents on pig farms" - manuscript. Master's thesis was performed at the department - "Technological processes and equipment of processing and food production", Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia 2021.

In the master's thesis the hydraulic model of the anaerobic filter with cyclic perturbation due to change of speed of movement, a free surface of liquid is developed. To solve these problems, a new technology for processing liquid pig manure using an anaerobic filter with a siphon drain has been developed. The functional dependence of the velocity of the free surface of the effluent in the filter is established.

Key words: manure effluents, anaerobic filter, biogas, organic fertilizers, hydraulic model.

Зміст

	ВСТУП	7
1	СТАН ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1.	Способи утримання тварин і системи видалення свинячого гною	9
1.2.	Технології переробки свинячого гною	16
1.3.	Технології анаеробного зброджування свинячого гною	20
1.4.	Способи інтенсифікації анаеробного зброджування свинячого гною	29
1.5.	Цілі і завдання досліджень анаеробної переробки свинарських гнойових стоків	32
2	ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	34
2.1.	Рух рідини і газу в анаеробному фільтрі	34
2.2.	Гідравлічна модель анаеробного фільтру з циклічним обуренням за рахунок зміни швидкості руху вільної поверхні рідини	38
3.	МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	46
3.1.	Загальна методика проведення експериментальних досліджень	46
3.2.	Методика проведення і планування експериментальних досліджень на моделюючій демонстраційній установці	47
3.3.	Методика проведення і планування експериментальних досліджень на лабораторній виробничій установці по метановому зброджуванню	54
3.4.	Математична обробка результатів експериментальних досліджень	61
4	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	63
4.1	Результати експерименту на моделюючій демонстраційній установці	63
4.2	Результати експерименту на лабораторній виробничій установці анаеробного фільтру з сифоновим відведенням	73
4.3.	Пропонована технологія анаеробної переробки гнойових стоків свинарського підприємства	85
	ГОЛОВНІ ВИСНОВКИ	87
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	88
	ДОДАТКИ	93

ВСТУП

Сучасні умови виробництва тваринницької продукції, зокрема свинарської, на промисловій основі вимагають підвищення числа і концентрації тварин на заданій площі, застосування ресурсозберігаючих технологій, з обов'язковим дотриманням вимог екологічної безпеки виробництва. Підвищення виробництва продукції свинарства веде і до збільшення виходу рідких відходів - гнойових стоків. Причому виробництво відходів свинарським підприємством у багато разів перевищує отримання цільового продукту. Таким чином, сучасне свинарське підприємства це комплекс споруд не лише для виробництва основної продукції, але і обов'язкової переробки відходів виробництва. Велика кількість відходів, їх висока вологість, патогенність і екологічна небезпека зумовлюють актуальність розробки заходів по їх переробці.

Одним з перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є застосування технології анаеробної переробки гнойових стоків свинарства. У основі пропонованої технології лежить роздільна біологічна обробка органічної речовини твердої і рідкої фракції свинячих стоків. Стабілізація органічної речовини твердої фракції буде зроблена прискореним компостуванням, з отриманням твердих органічних добрив. Для деструкції органічних речовин рідкої фракції застосовується оригінальна конструкція анаеробного фільтру. В результаті анаеробного зброджування виходить біогаз, - альтернативне газоподібне джерело енергії, яке може бути використане як моторне або котельне паливо. Оброблений стік фільтру є високоякісним мінералізованим органічним добривом. Застосування цієї технології переробки дозволить вирішити проблеми екологічної безпеки виробництва свинарської продукції, вона є енерго- і ресурсозберігаючою.

Об'єктом дослідження є технологічний процес анаеробного зброджування рідкого свинячого гною в анаеробному фільтрі з сифоновим відведенням.

Предмет дослідження - закономірності гідродинамічного обурення в

анаеробному фільтрі за рахунок зміни швидкості руху субстрату.

Задачі досліджень:

1. Розробити анаеробний фільтр з гідродинамічним обуренням за рахунок зміни швидкості руху, вільної поверхні рідини. Отримати гідравлічну модель для визначення залежності величини гідродинамічних обурень від параметрів роботи анаеробного фільтру.

2. Досліджувати вплив величини гідродинамічного обурення в анаеробному фільтрі на міру очищення гнойових стоків і вихід біогазу. Отримати моделі основних технологічних оцінних параметрів анаеробного фільтру.

3. Розробити технологію переробки гнойових стоків свинарських підприємств із застосуванням анаеробного фільтру з гідродинамічним обуренням.

Наукова новизна роботи:

- анаеробний фільтр з сифоновим відведенням, для переробки рідкої фракції свинячого гною з гідродинамічним обуренням за рахунок зміни швидкості руху, вільної поверхні рідини;

- функціональна залежність швидкості руху вільної поверхні стоків у фільтрі;

- технологічна лінія для переробки гнойових стоків з отриманням органічного добрива, біогазу.

РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Способи утримання тварин і системи видалення свинячого гною

На свинарських комплексах і фермах застосовують вигульну і безвигульну системи утримання тварин. Вигульна система утримання тварин може бути застосована як для племінних, так і для неплемінних ферм. У цій системі розрізняють станковий або вільно - вигульний способи змісту. Безвигульну систему застосовують на великих свинарських комплексах і спеціалізованих фермах, коли круглий рік тваринних містять в приміщеннях без вигону на вигульні майданчики і пасовища [7, 20].

Вибір системи гноєвидалення визначається виробничим призначенням і технологією утримання свиней (підстилова і безпідстильний) [14].

На репродукторних, відгодівельних і племінних фермах свиней містять з обмеженим використанням підстилки (різана солома, тирса, торф в обмежених кількостях). На свинарських комплексах промислового типу використовується безпідстильне утримання свиней [7, 14, 20, 24].

Система прибирання і транспортування гною з виробничих приміщень повинна задовольняти наступним зоогігієнічним вимогам [23, 32]:

- забезпечувати і підтримувати чистоту приміщень для утримання тварин, а також проходів і обгороджувальних;
- обмежувати освіту і проникнення шкідливих газів в приміщення, де містяться тварини;
- виключати проникнення шкідливих бактерій, вірусів, мікробів з гноєм з однієї секції в іншу;
- у разі виникнення захворювань ввести в технологічний процес певні ветеринарно-санітарні заходи для швидкої і ефективної їх ліквідації;
- забезпечити охорону довкілля від гнойових стоків і відходів ферм і комплексів;
- засоби прибирання гною мають бути зручними в процесі експлуатації і

не вимагати великих витрат праці на управління, ремонт і санітарно-профілактичну обробку.

Системи видалення гною за принципом дії і конструкції підрозділяються на механічні і гідравлічні (рис. 1.1) [3, 8, 33].

Механічні способи видалення і транспортування гною застосовуються на свинарських підприємствах потужністю до 24 тис. голів в рік. На свинарських підприємствах потужністю до 12 тис. голів в рік з механічними системами видалення гною при відповідному обґрунтуванні допускається застосування гідравлічних способів видалення і транспортування гною [8, 28].

При механічному способі видалення гною використовуються стаціонарні і мобільні засоби. До стаціонарних гноєприбиральними засобів відносяться транспортери (скребкові, штангові, шнекові і так далі) і скреперні установки зворотно-поступального руху. До мобільних засобів гноєвидалення відносяться різні типи бульдозерів і бульдозерні навішування [23, 28, 31].



Рис 1.1 - Системи видалення гною зі свинарських приміщень

Достоїнствами механічних систем видалення гною є отримання гною досить низької вологості, і вимагають відносно невеликих витрат. До недоліків цієї системи гноєвидалення відносяться високі металі- і енергоємність, недостатня експлуатаційна надійність, малий термін служби; великі витрати праці на прибирання гною, обслуговування і ремонт устаткування і так далі. Із зоогігієнічній точки зору механічні системи видалення гною також недостатньо досконалі. Тому механічні системи рекомендується застосовувати на невеликих фермах і комплексах [23,25,29].

На великих свинарських підприємствах поширено безпідстилоче утримання тварин, де найбільш застосовні гідравлічні системи видалення гною [15, 35]. До переваг цієї системи видалення гною відносяться: значне скорочення витрат праці на прибирання гною, висока надійність і тривалий термін служби систем, вони менш метало- і енергоємні, і відповідають зоогігієнічним вимогам, що пред'являються до тваринницьких приміщень [29]. Розрізняють наступні гідравлічні системи видалення рідкого гною зі свинарських приміщень: самопливну і прямою змивши водою [8, 27].

Систему видалення і транспортування гною, що гідрозмиває, допускається застосовувати у виняткових випадках (при реконструкції і розширенні великих свинарських підприємств на 54 і більше тис. свиней в рік при неможливості застосування інших способів гноєвидалення) [8]. Видалення гною з подовжного каналу свинарського приміщення при системі, що гідрозмиває, здійснюється за рахунок обміну кількістю руху між напірним струменем рідини і гнойовою масою [29]. Метод прямого змиву водою (гідрозмив) застосовують як виняток, оскільки він пов'язаний з великою витратою води [8, 34]. Згідно з вимогами при гідрозмиві повинна використовуватися непитна вода [8].

Самопливні системи видалення гною за принципом роботи розрізняють періодичної і безперервної дії. Самопливна система видалення гною безперервної дії застосовується у свинарниках при годуванні тварин сухими і текучими кормами без використання комбісилосу і зеленої маси [35].

Самопливна система безперервної дії забезпечує видалення гною за рахунок руху по природному ухилу, на принципі самопересування суміші екскрементів, тобто використовуються в'язкопластичні властивості рідкого гною. При вологості напіврідкого гною в межах 88...92% і виключенні попадання залишків корму в канали робота цієї системи гноєвидалення надійна, перевагами цієї системи є порівняно невелика витрата води для видалення гною, незалежність від технології змісту і годування тварин. До недоліків цієї системи гноєвидалення відносяться: накопичення придонного осаду, утворення мертвої зони в торці останньої секції гноєзбірного каналу. У свинарниках-маточниках

самопливну систему гноєвидалення застосовувати не рекомендується. Ця система рекомендується для застосування на дрібних фермах. [24, 25, 26].

При безпідстилочному утриманні тварин на усіх тваринницьких підприємствах можна застосовувати самопливну систему видалення гною періодичної дії. Ця система гноєвидалення відрізняється від самопливної безперервної дії тим, що в ній передбачено накопичення гною в гнійних каналах, вихід яких перекритий шиберами. Основним недоліком системи є велика витрата води і значне виділення сірководню при спуску гнойової маси, що призводить до погіршення мікроклімату [26, 27]. Різновидом самопливних систем видалення гною періодичної дії у свинарниках є система, в якій гнійний канал розділений бетонними перегородками на ванни або лотками [8, 25, 30].

В результаті бесподстилочного зміст свиней і застосування гідравлічної системи гноєвидалення отримують величезні маси гнойових стоків вологістю більше 97%, отже, виникає необхідність утилізації підвищеної кількості низькоконцентрованих стоків. Вирішення цієї проблеми є актуальним завданням, і може бути вирішена за допомогою різних технологій підготовки і переробки свинячого гною [23, 26, 37].

Свинячий гній є сумішшю рідких і твердих екскрементів тварин, технологічної і змиваючої води, газоподібних речовин, відходів корму і фізіологічних виділень тварин (епідерміс, слина, піт і так далі) [4, 33].

По мірі мікробіологічного розкладання свинячий гній розрізняють (рис. 1.2) [4]:

- свіжий - гній без ознак мікробіологічного розкладання;
- слаборозкладні - гній, в якому в результаті мікробіологічних процесів кормові залишки мають колір, що трохи змінився, і міцність;
- напівперепрілий - гній, в якому в результаті мікробіологічних процесів підстилка і кормові залишки набули темно-коричневого кольору, втрачають міцність і легко розриваються;
- що перепрів - гній, в якому візуально не можна виявити рослинні залишки, що не розклалися.



Рис. 1.2 - Класифікація свинячого гною за мірою мікробіологічного розкладання [4]

Вихід свинячого гною залежить від кількості і якості споживаного корму, віку тварин, умов їх утримання, способу видалення гною, справності системи автопоїння [23, 32, 36]. Вихід свинячого гною визначається різними методами [23, 33] широке застосування отримав нормативний. Цей метод дозволяє відстежити вплив найбільш значимих чинників, що визначають вихід свинячого гною. Добовий вихід свинячого гною визначається [8, 23, 35]:

$$Q_{\text{обц}} = \sum_{j=1}^m (Q_{\text{эj}} + Q_{\text{ТВj}} + Q_{\text{ВНj}} + Q_{\text{Пj}}) * n_j$$

де $Q_{\text{эj}}$ - добовий вихід екскрементів (кал, мочи), м³;

$Q_{\text{ТВj}}$ - добова витрата води на технологічні потреби (миття приміщень, обладнання і так далі), м³;

$Q_{\text{ВНj}}$ - добова витрата води на видалення гною, м³;

$Q_{\text{Пj}}$ - добова витрата підстилки, залишки кормів, м³;

n_j - кількість тварин в технологічній групі;

m - кількість технологічних груп.

Властивості свинячого гною підрозділяють на фізико-механічні, хімічні і біологічні [20, 26, 27].

До фізико-механічних властивостей відносяться: вологість, щільність, гранулометричний склад і властивості (в'язкість і гранична напруга зрушення) реологій [4, 23].

Вологість (вміст вільної води), є основним показником свинячого гною, яка

залежить від вживаної системи видалення гною. Вологість гною залежить від нативної вологості калу і сечі (для свиней вона складає 76...78 % і 94...95 % відповідно, загальна 87...88 %) і міри розбавлення водою [22, 26, 27].

Залежно від вологості розрізняють наступні види свинячого гною [1, 4, 8]:

- підстилковий при вологості до 85 (суха речовина (СВ) більше 15 %);
- безпідстильний напіврідкий до 92 % вологості (СВ від 8 % до 14 %);
- безпідстильний рідкий до 97 % вологості (СВ від 3 % до 8 %);
- гнойові стоки більше 97 % вологості (СВ менше 3 %).

На великих свинарських комплексах і фермах використовується безпідстильний спосіб утримання тварин із застосуванням гідравлічних систем видалення гною [23, 23].

Щільність гною залежить від багатьох чинників: вологості, розмірів часток гнойової маси, питомої ваги екскрементів, питомого опору фракцій та ін. При збільшенні вологості свинячого гною - щільність знижується. Щільність рідкого свинячого гною складає 1050...1010 кг/м³ [26, 27].

Гранулометричний склад свинячого гною неоднорідний і залежить від віку тварин, типу і раціону годування. При годуванні тварин повнораціонними концентрованими кормами, понад 60% сухої речовини гною складають дрібнодисперсні частки розміром до 1 мм. При годуванні свиней багатокомпонентними кормосумішами отримують гній з грубодисперсними частками величиною більше 1 мм. У безпідстильному гної можуть бути механічні включення 0,2...1,0 % від маси екскрементів [26].

Рідкий гній це грубодисперсна система, що є неньютонівською рідиною і характеризується двома властивостями реологій: в'язкістю і граничною напругою зрушення. Ці параметри впливають на вибір способу видалення, транспортування і внесення гною. У свою чергу, в'язкість і гранична напруга зрушення гною залежать в основному від двох величин - вологості і температури. Так зі зменшенням вологості рідкого гною збільшуються його в'язкість і гранична напруга зрушення. А, при збільшенні температури гранична напруга зрушення і в'язкість знижуються. При зниженні вологості рідкого свинячого

гною (при годуванні гранульованими комбікормами) з 94% до 82%, коефіцієнт динамічної в'язкості і гранична напруга зрушення складають відповідно до 0,2 і 1,9 Па*с і 1,2 і 90 Па. В'язкість і гранична напруга зрушення знижуються на 25...40% при підвищенні температури від 10 до 20°C [25, 27, 29].

Хімічні властивості свинячого гною залежать: від міри розбавлення екскрементів водою, статево-віковий групи тварин; від раціону їх годування; типу приміщення утримання тварин і параметрів довкілля. У складі свинячого гною містяться поживні речовини, які потрібні для життєдіяльності сільськогосподарських культур. Свинячий гній містить від 50 до 70% розчинного аміачного азоту, тому має високу цінність удобрювача. Азотовмісні з'єднання є присутніми в колоїдному, розчиненому і зваженому станах і можуть переходити з одного стану в інший. Органічна речовина у свинячому гної складає 70...80% від сухої маси, і представлено неперетравленими речовинами з високим вмістом вуглецю (лігнін, целюлоза, клітковина). У складі рідкого гною фосфор і калій знаходяться в розчинній формі і досить легко засвоюються рослинами. [13, 33].

Біологічні або бактеріологічні властивості свинячого гною складають його екологічну характеристику, оскільки в гної містяться патогенні (ентеробактерії, ентеровіруси та ін.) і умовно патогенні мікроорганізми, насіння смітних рослин, яйця і личинки гельмінтів. Також безпідстильний гній може бути обсіменений стійкими мікроорганізмами, такими, як, наприклад, збудники туберкульозу, сибірської виразки [1, 4, 5, 13].

Свинячий гній, залежно від міри розкладання, відносять до III або IV класу небезпеки, що визначає величину негативної дії на довкілля [2, 12].

В результаті аналізу способів змісту, систем видалення гною, складу і властивостей свинячого гною встановлено, що:

- 1) у сучасному свинарстві найбільш поширені безпідстилове утримання тварин, із застосуванням самопливних систем видалення гною;
- 2) виникають труднощі з підготовкою і переробкою великих об'ємів відходів виробництва - низькоконцентровані гнойових стоків;
- 3) свинарське підприємство є джерелом відходів III або IV класу небезпеки,

що є причиною забруднення довкілля.

Тому необхідно зробити огляд наявних технологій підготовки і переробки гнойових стоків свинарства, з метою дотримання вимог екологічної безпеки і застосування продуктів переробки в кругообігу речовин.

1.2 Технології переробки свинячого гною

До технологій переробки і підготовки свинячого гною до використання відносять: переробку рідкої і твердої фракції, компостування, вермікомпостування і анаеробну переробку гнойових стоків в метантенках з отриманням біогазу і використання його для отримання теплової і електричної енергії (рис. 1.3) [8, 16, 20].

Рідкий гній і гнойові стоки свинарських комплексів промислового типу потужністю 12 тис. свиней в рік і більше піддаються розділенню на тверду і рідку фракції. Розділення на фракції рідкого гною і гнойових стоків здійснюється гравітаційним, механічним і комбінованими способами (рис. 1.4) [8, 27, 28, 30].



Рис. 1.3. Технології переробки свинячого гною

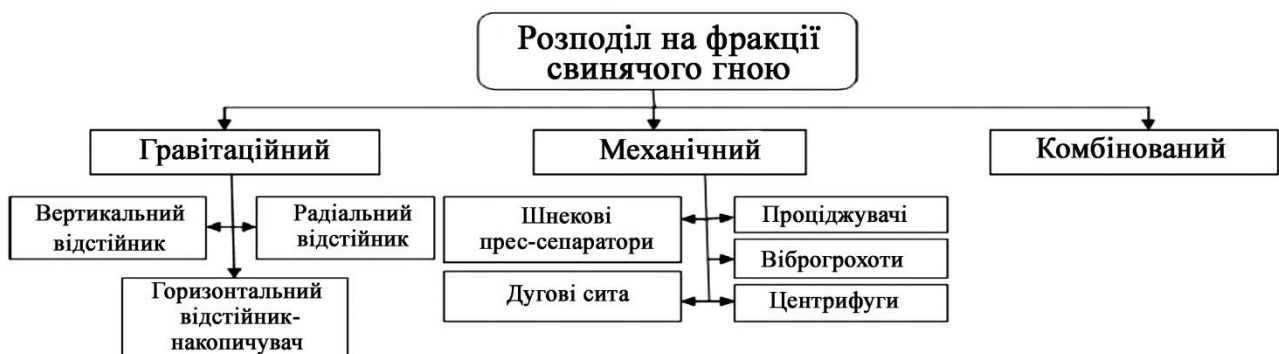


Рис. 1.4. Розділення свинячого гною на фракції

Гравітаційний спосіб розділення застосовується на свинарських підприємствах в горизонтальних відстійниках - накопичувачах, вертикальних і радіальних відстійниках [8, 21].

Для механічного розділення рідкого гною і гнойових стоків слід застосовувати установки для відділення крупнодисперсних часток дугові сита, різні види сепараторів, центрифуги, віброгрохоти, згущувачі (центрифуги) і проціджувачі [8, 21, 22]. Рідкий гній у своєму складі містить вільну і пов'язану рідину. Вільна рідина відділяється самопливно за допомогою сили тяжіння, пов'язана - знаходиться в твердих складових гною. Використання шнекових пресс-сепараторов найефективніше для розділення на фракції гнойових стоків свинарських підприємств. Шнековий прес-сепаратор дозволяє відокремити усю вільну рідину і частину пов'язаної води [8].

Рідка фракція гнойових стоків переробляється шляхом природного або штучного біологічного очищення. Природна біологічна обробка здійснюється шляхом зберігання в гноєсховищах промислових свинокомплексів (термін зберігання 12 місяців) або у біологічних ставках. За типом і конструктивним виконанням біологічні ставки бувають анаеробно-аеробні, з природною і штучною аерацією, одно- і багатоступінчасті і БОКС - ставки [8, 75].

Рідка фракція гнойових стоків переробляється за допомогою біологічного очищення шляхом штучного або природного способу в аеротенках, біологічних для рибовода ставках, на іригаційних полях утилізації [8, 95].

Тверду фракцію гною доцільно піддавати компостуванню для знезараження від збудників інфекційних, інвазивних захворювань і девіталізації [8, 15, 16]. В якості наповнювача при компостуванні гною використовуються торф, відходи деревообробки (тирса), різана солома, деревне листя і інші, органічні вологи поглинаючі компоненти [8, 16, 22]. При вологості твердої фракції гною не більше 75% компостування здійснюється в чистому вигляді без додавання вологи поглинаючих наповнювачів. Оптимальна вологість компостованої суміші,

повинна складати не більше 70%, відношення вуглецю до азоту (C: N) 20:1 - 30:1 і рН 6,0 - 8,0. Як правило, компостування гною здійснюється на прифермських відкритих гідроізольованих майданчиках і в стаціонарних механізованих цехах з твердим покриттям. Приготування компостів в теплу пору року може здійснюватися на спеціально підготовлених польових майданчиках, розташованих в районі удобрюваних компостом сільськогосподарських угідь. В процесі компостування під впливом життєдіяльності термогенних мікроорганізмів досягається висока температура, що забезпечує знезараження від більшості видів патогенної мікрофлори, знищення яєць гельмінтів і втрату схожості насіння смітних рослин [8, 23].

Технологічний процес компостування гною здійснюється пасивним і активним способами [8, 23, 35]. Залежно від природно- кліматичних умов, початкових параметрів компостованої суміші, вимог до готового компосту, епізоотичної ситуації на свинарських підприємствах і екологічної обстановки призначаються у кожному конкретному випадку режим компостування. Технологічний процес компостування при пасивному (традиційному) способі здійснюється в природних умовах у буртах на спеціалізованих ділянках свинарських комплексів промислового типу або польових майданчиках [8, 27]. Прискорений спосіб компостування (метод біологічної ферментації) заснований на управлінні розвитком аеробних мікроорганізмів. Цей спосіб компостування виконується в спеціальних біоферментерах з утепленими стінами різної конструкції з корисною висотою до 2 м. Технологічний процес компостування здійснюється в штучно створених умовах при безперервній аерації компостної суміші шляхом примусового подання повітря в шар маси, що знаходиться у біоферментері [8, 25]. Автором [20] розроблена інноваційна технологія переробки рідкого гною у високоякісні концентровані органічні добрива методом прискореного компостування із застосуванням мікробіологічної активної-добавкою.

Біоферментери і реактори за принципом роботи підрозділяються на установки безперервної і періодичної дії. Технологія прискореного

компостування гною в періодичному режимі є найбільш поширеною. В результаті отримуємо продукт - компост багатоцільового призначення. Він є однорідною сипкою масою вологістю 55...70% темно- коричневого кольору без неприємного запаху. До установок безперервної дії для отримання біогумусу з гною відносяться реактори барабанного типу різних конструкцій [8, 13].

У технології вермикомпостування основним елементом є черв'яки, що живляться органічними відходами гнойових стоків і виділяють екологічно чисте, високоякісне добриво – біогумус (вермикомпост) [4, 29]. Біогумус у своєму складі містить поживні і біологічні активні речовини, стимулюючі зростання і розвиток сільськогосподарських культур. Основними недоліками вермикомпостування є низька продуктивність близько 1 т/м² в рік, необхідність створення умов для нормальної життєдіяльності черв'яків: вологості, температурного режиму, підгодівля [23, 30]. Ця технологія вермикомпостування придатна для малих об'єктів [20].

Для підготовки до використання бесподстилочного рідкого гною при вологості до 97% рекомендована технологія анаеробного зброджування у біоенергетичних установках (БЕУ) з отриманням високоякісного органічного добрива і біогазу [8, 23, 30]. Ця технологія забезпечує дегельмінтизацію, втрату схожості насіння смітних рослин, пригнічення патогенних форм мікроорганізмів, підвищення цінності удобрювача оброблюваного продукту [8]. Технологія анаеробного зброджування рідкого гною передбачає підігрівання до заданої температури і зброджування гнойових стоків в герметичних реакторах (ферментерах) з підтримкою регламентованих параметрів технологічного процесу, збір і утилізацію біогазу, і використання зброженої маси за призначенням [12, 15, 19].

Розглянувши різні технології переробки свинячого гною в цій роботі, пропонуємо технологію переробки рідкої фракції свинячого гною. Найбільш перспективним варіантом переробки рідкої фракції свинячого гною вважаємо анаеробне зброджування, при якому отримуємо цінне органічне добриво і побічний продукт у вигляді біогазу.

1.3 Технології анаеробного зброджування свинячого гною

Технологія анаеробної переробки гною - це комплекс заходів від початку вступу сировини до отримання кінцевих продуктів зброджування.

До основних переваг застосування технології анаеробного зброджування відносяться [8, 20]:

- скорочення термінів підготовки рідкого гною до використання, більш ніж в 10 разів;
- використання обробленої маси без обмежень;
- дотримання ветеринарно-санітарних, гігієнічних і екологічних вимог за рахунок знешкодження, знезараження, дезодорації і стабілізації складу збродженої маси;
- зниження у збродженій масі мікробною обсімененості і скорочення термінів зберігання і використання гною;
- зниження емісії шкідливих речовин в атмосферне повітря;
- отримання і використання альтернативного джерела енергії - біогазу;
- виконання агрономічних вимог за рахунок пригнічення схожості насіння смітних рослин;
- збільшення долі аміачного азоту в підготовленому добриві, що призводить до підвищення врожайності сільськогосподарських культур до 25% при його внесенні в ґрунт.

Вимоги, що пред'являються до анаеробного зброджування гнойових стоків [8, 25]:

- підготовлена маса має бути свіжіша з максимальним вмістом органічної речовини, мати максимально високу температуру;
- маса має бути гомогенною по складу (не повинна містити включення розміром більше 30 мм і тверді частки: бетон, глину, пісок та ін.), однорідною по концентрації твердих і зважених часток;
- маса має бути гідравлічно транспортабельною і рівномірно поступати на

зброджування;

- зброджувана маса не повинна містити речовин, що пригнічують життєдіяльність метанотвірних мікроорганізмів і інгібувальних технологічний процес анаеробного зброджування більше допустимих концентрацій. До таких речовин відносяться різні форми азоту і більшість важких, лужних, лужноземельних металів, сульфіди, кисень, антибіотики, дезинфікуючі засоби і так далі.

Для оптимальної роботи біоенергетичної установки потрібні [6, 12]:

- анаеробні умови в метантенку;
- дотримання температурного режиму;
- оптимальний кислотно-лужний баланс рН;
- періодичне перемішування зброджуваної маси;
- дотримання вимог до характеристик відходів, що переробляються, визначають ефективність роботи біогазової установки;
- підтримка необхідного режиму роботи метантенка, періодичність і розрахункове значення завантажуваної маси сировини (біомаси).

Для переробки тваринницьких стоків застосовують метантенки з фіксованою біомасою - анаеробні фільтри [28, 36].

Анаеробний фільтр - це метантенк, увесь об'єм якого заповнений яким- або твердим носієм. У цих установках з метою підтримки високої концентрації активної біомаси для прикріплення мікроорганізмів використовуються тверді підкладки - іммобілізатори, [28, 36, 37]. Застосування мікрофлори прикріплену до твердого носія має наступними перевагами [31, 32]:

- створюється висока концентрація мікробної популяції, що забезпечує високу швидкість деградації органічної речовини;
- забезпечується висока стабільність і надійність, що виражається в здібності витримувати великі перевантаження і перерви в поданні субстрату, а також стійкість роботи при перепадах температур;
- підвищується метаболічна активність мікроорганізмів за рахунок розвитку специфічної мікрофлори, що виникає за рахунок адаптаційних процесів

природної популяції до певних умов середовища, внаслідок чого зростає її питома активність;

- покращується седиментаційні процеси в обробленому осаді, за рахунок більшої щільності і меншої вологості біоплівки, що відторгається.

В результаті, анаеробний фільтр може обробляти порівняно великі об'єми стічних вод з необхідною ефективністю.

На основі аналізу літературних джерел [4, 6, 12, 18, 25, 29] складена класифікація анаеробних фільтрів за їх основними параметрами (рис. 1.5):

1. По напрямку руху потоку субстрату анаеробні фільтри підрозділяються :
 - реактори з висхідним рухом оброблюваної стічної рідини;
 - реактори з низхідним рухом оброблюваної стічної рідини.

У реакторах з висхідним потоком (AF - реактор) подання субстрату здійснюється в нижній частині анаеробного фільтру, а відведення обробленого стоку і біогазу у верхній. Рух потоків рідини і біогазу здійснюється в одному напрямі. Біомаса утримується у вигляді флокул і гранул, розташованих в порожнечах завантажувального матеріалу, а також у вигляді біоплівки, прикріпленої до поверхні іммобілізатора [18, 29].

У реакторах з низхідним потоком (DSFF - реактор) подання субстрату здійснюється у верхній частині анаеробного фільтру, відведення обробленого стоку - в нижній. Перевага цієї конструкції анаеробного фільтру в тому, що в умовах низхідного потоку метаногенная біомаса краще утримується у вигляді біоплівки, тим самим підвищується ефективність роботи реактора до 95% [29]. Дослідження ряду авторів [25] по конструктивному оформленню реакторів показали, що анаеробні фільтри з нерухомими носіями доцільніше виконувати у вигляді вертикальних циліндричних колон з проходженням оброблюваної стічної рідини від низу до верху.



Рис. 1.5 - Класифікація анаеробних фільтрів

2. Анаеробні фільтри по виду руху потоку оброблюваного субстрату класифікуються [29]:

- з рівномірним потоком, що встановився;
- з несталим нерівномірним потоком.

У анаеробному фільтрі існує небезпека утворення переважних каналів протоки із-за надмірного накопичення біомаси в міжзавантажувальному просторі. Виникнення цих каналів може привести до того, що оброблювані стоки «проскакують» основний шар біомаси, тим самим виникає рівномірний вид руху потоку, що встановився [36, 40]. За відсутності переважних каналів протоки рідини в анаеробному фільтрі має місце несталий нерівномірний вид руху [30].

3. Анаеробні фільтри по температурному режиму підрозділяються [4, 6]:

- з психрофільним (від 10°C до 25°C);
- з мезофільним (від 30°C до 35°C);
- з термотолерантним (від 40°C до 45°C);
- з термофільним (від 50°C до 60°C).

Температура є одним з найважливіших чинників, що впливають на швидкість зростання мікроорганізмів і основні біохімічні реакції, що протікають в процесі анаеробного зброджування. У кожній температурній зоні метанове бродіння здійснює своя специфічна асоціація мікроорганізмів [24, 31]. Психрофільний режим використовуються в країнах з печеною і теплим кліматом (Китай, Індія і ін.), в таких установках немає необхідності в застосуванні спеціальних пристроїв по підтримці температури. Цей режим характеризується найменшою метаболічною активністю і репродуктивною здатністю мікроорганізмів [25]. У роботі [26] відмічено про енергетичну доцільність застосування цього режиму бродіння відносно витрат на нагрів і підтримку температурного оптимуму в умовах Східного Сибіру.

Переваги використання мезофільного режиму: достатня метаболічна активність, мала енергоємність і репродуктивна здатність мікроорганізмів, стабільність процесу метаногенеза. До недоліків цього режиму відносяться: отриманий ефлюент не є повністю стерильним, виділення газу менш інтенсивне, чим при термофільному [12].

У роботі [26] вказується про ефективність процесу бродіння при 40°C (термотолерантний режим зброджування). Цей температурний режим був закладений в основу технології двохстадійного зброджування і показав високу ефективність процесу за швидкістю.

При термофільному режимі зброджування досягається найвища міра санітарно-гігієнічної безпеки ефлюента, виділення газу інтенсивніше, потрібно менші об'єми метантенков. Цей режим вимагає підтримки постійної оптимальної температури, що призводить до великих витрат енергії, порушенню метаболізму мікроорганізмів при відхиленні температури на 1° - 2°C від

оптимуму [24].

Таким чином, температурний режим, передусім, робить вплив на швидкість біологічної конверсії органічної речовини мікроорганізмами. Найбільш раціональним температурним режимом в умовах Східного Сибіру є психрофільний. Зниження метаболічної активності мікроорганізмів, що визначає уповільнене газовиділення, компенсуватиметься збільшенням експозиції зброджування [25].

4. Анаеробні фільтри за типом іммобілізатора розрізняють [29]:

- анаеробні фільтри з рухливим носієм;
- анаеробні фільтри з нерухомим носієм.

Як прикріплення мікроорганізмів використовуються іммобілізатори з нерухомого (НП-реактор) або рухливого (ПС - реактор) поверхнями завантаження. Перші іммобілізатори нерухомі один відносно одного і стінок реактора, потік рідини або газу проходить вільно. В якості нерухомих носіїв використовують плівку-носій (плівка з полівінілхлориду), нитки поліпропиленовіе, йоржі (лавсанові, капронові), вертикальні листи з полімерного матеріалу [29, 31].

Рухливий іммобілізатор переміщається в реакторі під дією власної ваги або конвективного. При цьому середовище (газ, рідина) рухається протитечією або прямою по відношенню до низхідного потоку інертного носія. В якості рухливого іммобілізатора застосовують: пісок дрібний, окисел алюмінію і інші носії, які можуть при високих швидкостях знаходитися в зваженому стані [29].

5. Анаеробні фільтри за матеріалом виготовлення іммобілізатора підрозділяються на синтетичні і мінеральні [29, 31].

Матеріал іммобілізатора повинен забезпечувати хорошу «сплеяемость» мікроорганізмів з поверхнею іммобілізатора, щоб підтримувати в реакторі підвищені концентрації біомаси, тим самим забезпечувати високі швидкості процесу анаеробного зброджування тваринницьких стоків. До синтетичних відносять іммобілізатори виготовлені з лавсану, капрону, нейлону, поліетилену, пластмаси та ін. До мінеральних - скло, кераміку, камінь, метал та ін. [29, 31].

6. По питомій площі поверхні іммобілізатора розрізняють на високу і низьку [29].

Головним критерієм при виборі матеріалу нерухомого іммобілізатора є його питома площа. Матеріал носія слід вибирати так, щоб виключити обростання поверхні іммобілізатора, тобто потрібна деяка відстань в міжзавантажувальному просторі для запобігання їх забиванню [25]. Площа іммобілізаторов з високою питомою поверхнею може складати до 10 000 м²/м³. Носії з низькою питомою поверхнею мають значення від 70 до 200 м²/м³ [27].

7. Анаеробні фільтри по інтенсифікації процесу зброджування класифікуються на:

- фізіологічні;
- технологічні методи [18, 29].

До фізіологічних методів відносять гранулоутворення (флокуляція) і седиментацію. Інтенсифікація процесу анаеробного зброджування технологічно можливо шляхом підвищення температури зброджування; збільшенням концентрації мікроорганізмів в реакторі; введення стимуляторів зростання мікроорганізмів; підтримкою оптимальних величин співвідношення C: N і збурюючою дією [18, 29].

Підвищення температури процесу анаеробного зброджування призводить до розвитку і переважання іншого штаму бактерій, які мають більшу метаболічну активність, також зростає швидкість конверсії органічних речовин у біогаз, зменшується час перебування субстрату в реакторі [25].

Збільшення концентрації мікроорганізмів в метантенках досягається шляхом повернення активної анаеробної біомаси в реактор або утриманням мікроорганізмів в реакторі. У анаеробних фільтрах чаші всього використовується другий спосіб. Утримання мікроорганізмів в реакторі можливе: гранулоутворенням або седиментацією; шляхом іммобілізації у вигляді біоплівки на твердих нерухомих або рухливих поверхнях носія [25].

На процес анаеробного бродіння позитивно впливає додавання речовин-стимуляторів зростання мікроорганізмів. В якості стимуляторів додають в

реактор біологічно активні речовини (БАВ), наприклад, ензими, природні з'єднання ізопренів; водень; "Мелафен" - синтетичний стимулятор розвитку рослин, є сіллю меламіну біс (оксиметил) фосфінової кислоти та ін. До основних переваг додавання речовин-стимуляторів у біореактор відносяться: збільшення швидкості розпаду і виходу біогазу; підвищення температури усередині реактора; що викликає адсорбцію деяких речовин (пестициди, важкі метали та ін.) [29].

На процес метанового зброджування тваринницьких стоків, більшою мірою, впливає наявність в субстраті поживних речовин, вітамінів, розчинних з'єднань азоту, мінеральних речовин і мікроелементів. Співвідношення C:N показує загальне співвідношення вуглеводів із загальним вмістом азоту. Оптимальні значення співвідношення C:N підтримує стабільність процесу зброджування і має бути на думку авторів [31] 10:1 або 30:1.

За рахунок циклічної зміни тиску на вільну поверхню рідини або швидкості руху рідини можливе створення гідродинамічного обурення в анаеробному фільтрі, яке у свою чергу, впливає на інтенсифікацію процесу зброджування [29].

8. Анаеробні фільтри по виду завантажуваних субстратів підрозділяються: реактори для обробки низькоконцентровані по сухій речовині стічних вод різних галузей промисловості і тваринницьких стоків, що досягають високої міри очищення цих відходів (до 95%) при малому часі експозиції зброджування, за рахунок іммобілізації мікроорганізмів на твердому носії [25].

На основі виконаного аналізу конструкцій анаеробних фільтрів, сформульовані наступні висновки (визначення основних раціональних параметрів анаеробного фільтру в умовах Сходу):

- по напрямку руху оброблюваної рідини прийнятніший реактор з низхідним потоком;
- для зменшення витрат на обігрів реактора в умовах Східного Сибіру прийнятніший психрофільний температурний режим;
- за типом іммобілізатора ефективні нерухомі носії, у вигляді поліетиленових ниток;

- для запобігання утворенню переважних каналів і забивання реактора слід вибрати оптимальне завантаження і визначити відстань між ними, щоб потік оброблюваної рідини був нерівномірним і несталим;
- для інтенсифікації процесу анаеробного зброджування потрібне створення циклічних обурень за рахунок зміни тиску і швидкості руху вільної поверхні в реакторі.

1.4 Способи інтенсифікації анаеробного зброджування свинячого гною

Існують різні методи інтенсифікації масообміну в системі «Рідина - тверда поверхня» [20, 30], які на нашу думку можна підрозділити на активні, пасивні і комбіновані (рис. 1.6).

Активна інтенсифікація масообміну полягає в ефективному використанні усього об'єму метантенка за допомогою додаткових пристосувань і маніпуляцій з конструкцією. До активної інтенсифікації масообміну відносяться: пульсація, рециркуляція, вібрація і обертання конструкції, і перемішування субстрату [6, 20].

Для забезпечення сприятливого температурного режиму і гідродинамічних умов для життєдіяльності мікроорганізмів упродовж усього технологічного процесу, а також досягнення максимальної взаємодії усіх реагуючих шарів проводиться перемішування зброджуваної маси в метантенку [6, 12, 20].

Вимоги, що пред'являються до активних і комбінованих методів інтенсифікації масообміну [6, 20]:

- вивільнення біогазу, що утворюється;
- запобігання утворенню кірки і осаду;
- запобігання різниці температур ділянок усередині реактора;
- рівномірний розподіл популяції бактерій;
- запобігання утворенню порожнин і скупчень, які зменшують робочу площу реактора.



Рис. 1.6 - Інтенсифікація масообміну в системі «Рідина - тверда поверхня»

До основних способів перемішування зброжуваної маси відносяться: механічні, пневматичні і гідравлічні. Перемішування сировини в метантенку збільшує вихід біогазу до 50 % [6].

Механічне перемішування здійснюється мішалками [11, 21, 22]. Головним недоліком механічних мішалок є наявність обмеженої зони перемішування, що призводить до виникнення застійних зон, в яких скупчується осад, отже, їх допустимо встановлювати в метантенках невеликої місткості [17]. При пневматичному перемішуванні біогаз, пропускається через товщу сировини; при гідравлічному перемішуванні - перекачування сировини здійснюється з верхньої зони реактора в нижню [6, 8].

Прикладом пасивної інтенсифікації масообміну є іммобілізація мікроорганізмів на твердій нерухомій поверхні.

В процесі метанового зброжування субстрату можливе застосування комбінованої інтенсифікації масообміну (активна і пасивна інтенсифікації застосовуються одночасно) за рахунок створення гідродинамічного обурення.

Інтенсифікувати процес анаеробного зброжування субстрату можливо створенням гідродинамічного обурення за рахунок зміни тиску і швидкості. У роботі [23] розглянута інтенсифікація процесу анаеробного зброжування субстрату в анаеробному фільтрі створенням гідродинамічного обурення за рахунок зміни тиску.

У цій роботі пропонується інтенсифікація процесу зброжування субстрату

в анаеробному фільтрі створенням гідродинамічного обурення за рахунок зміни швидкості руху вільної поверхні рідини в реакторі.

Конструкція метантенка для обробки свинарських стоків є анаеробним фільтром з сифоновим відведенням, яке служить джерелом циклічних обурень.

Розроблений метантенк (рис. 1.7) є вертикальним теплоізольованим фільтром 1 з підведенням тваринницьких стоків з верхньої частини. У середині фільтру розташований іммобілізатор 5, на якій прикріплюються мікроорганізми. Відведення оброблених стічних вод здійснюється в нижній частині фільтру через патрубок 3. Відведення біогазу відбувається через гідравлічний затвор 7, що забезпечує відносно постійний тиск у фільтрі. Гідравлічний затвор є місткістю, заповненою водою, в яку занурений патрубок 6, що виходить з газового об'єму фільтру. Величина тиску, при якому відбувається спрацьовування гідравлічного затвора залежить від висоти занурення патрубка 6, змінюючи яку можна підтримувати задані межі коливання тиску в газовому об'ємі. Сифонне відведення для відпрацьованих стоків складається з бака 9 і трубопроводу 10 [25].

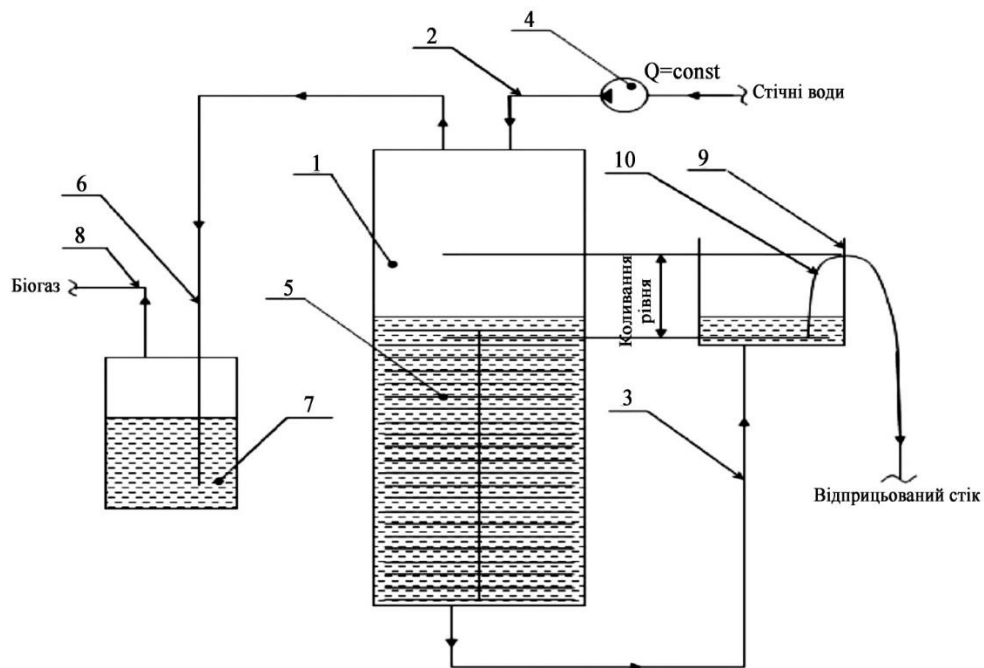


Рис. 1.7 Анаеробний фільтр з сифоновим відведенням

1.5 Цілі і завдання досліджень анаеробної переробки свинарських гнойових стоків

Мета роботи - обґрунтування і розробка технології переробки рідкого свинячого гною із застосуванням анаеробного фільтру з гідродинамічним обуренням для очищення від органічних речовин і отримання біогазу.

На основі поставленої мети сформульовані наступні завдання досліджень:

1. Розробити анаеробний фільтр з гідродинамічним обуренням за рахунок зміни швидкості руху вільної поверхні рідини у фільтрі. Отримати гідравлічну модель для визначення залежності величин гідродинамічних обурень від параметрів роботи анаеробного фільтру.

2. Досліджувати вплив гідродинамічного обурення в анаеробному фільтрі на міру очищення стоків і вихід біогазу. Отримати регресійні моделі основних параметрів анаеробного фільтру.

3. Розробити технологію переробки рідкого свинячого гною із застосуванням анаеробного фільтру з гідродинамічним обуренням.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Рух рідини і газу в анаеробному фільтрі

Субстрат в анаеробному фільтрі рухається вниз, утворюючи низхідний потік рідини через іммобілізатор. В результаті життєдіяльності анаеробних метангенеруючих мікроорганізмів, прикріплених на іммобілізатор, відбувається виділення насиченого розчину біогазу. Досягши перенасичення водного розчину відбувається процес акумуляції найдрібніших молекул біогазу. Досягши газової бульбашки критичної величини він починає рух - підйом на поверхню. Таким чином, в анаеробному фільтрі рідка фаза рухається вниз, а газоподібна вгору [28].

Процес біологічного очищення тваринницьких стоків з мікрофлорою імуннодефіциту є складним багатостадійним процесом, що протікає в гетерогенній двофазній системі (рідина - газ). Ці багатофазні процеси супроводжуються явищами масопередачі, це перенесення поживних речовин субстрату з рідини до поверхні біоплівки, і далі всередину біоплівки до твердої поверхні [28].

У основі цих транспортних процесів лежить дифузійне перенесення, яке ускладнене біохімічними реакціями, що протікають на твердій поверхні біоплівки, населеної мікроорганізмами. Отже, на масопереніс впливає метаболізм мікрофлори імуннодефіциту [28].

На рис. 2.1 зображена схема руху біогазового бульбашки через сітку касетного іммобілізатора. У міру наближення бульбашки до сітки касети він деформується. При проході швидкість руху субстрату збільшується, що дещо знижує тиск. Зниження тиску викликає збільшення об'єму бульбашки, а так само міделевого перерізу. Що викликає локальне підвищення швидкості бульбашки. Таким чином, проходження через касетного іммобілізатора створює додаткові обурення і турбулізацію потоку, що сприяє масообміну [28].

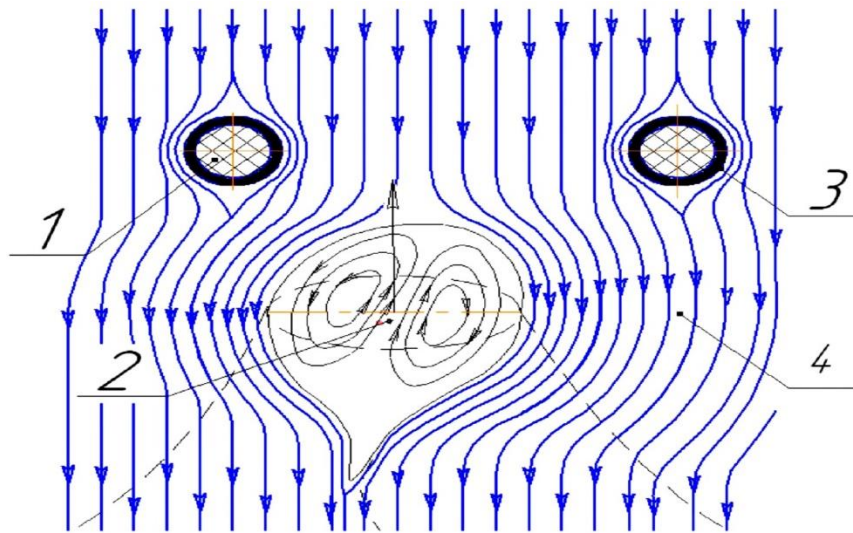


Рис. 2.1 Схема руху рідини і газу в анаеробному фільтрі: 1 - капроновий іммобілізатор (волосінь); 2 - біогазова бульбашка; 3 - біоплівка; 4 - оброблювана рідина.

Освіта і рух бульбашки пов'язана з масопередачею біогазу в субстраті. Розглянемо процес масопередачі при русі бульбашки, який ускладнений внутрішніми циркуляційними течіями газу, тобто поверхня розділу фаз рухлива. Цю картину краще всього представити у вигляді схеми двозонної моделі, заснованої на дифузійному пограничному шарі (див. рис. 2.2). На схемі яскраво виражені дві області - ядро потоку фаз і пограничний дифузійний шар. По основному рівнянню масопередачі (закону Фіка) відомо, що масопередача здійснюється під дією градієнта концентрації [23].

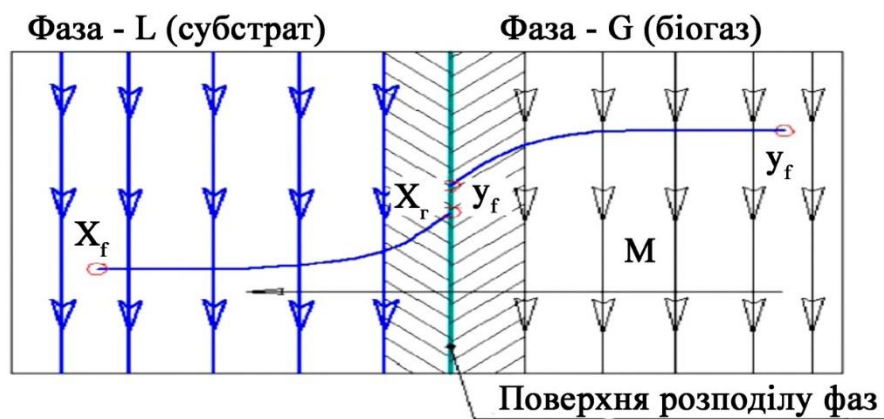


Рис. 2.2. Схема двозонної моделі масопередачі біогазу

Уявимо, що концентрація біогазу в рідкій фазі нижча, ніж в бульбашкаї. У

ядрі потоку перенесення речовин (біогазу у тому числі) здійснюється за рахунок конвективної дифузії (у цій області концентрації практично однакові - y_f , x_f - концентрації речовини в ядрі потоку; y_G , x_G - концентрації речовини на межі розділу фаз). У міру наближення до межі розділу фаз вплив конвективної складової знижується і масопередача, досягається практично тільки за рахунок молекулярної дифузії (за рахунок градієнта концентрації).

Передбачається, що концентрації на поверхні розділу фаз y_G , x_G дорівнюють рівноважним концентраціям.

Необхідно уточнити, що передача маси вестиметься тільки при концентрації біогазу в субстраті нижче його рівноважної концентрації - $x_p > x_f$. При достатньому насиченні субстрату біогазом відбуватиметься рівноважний взаємообмін в пограничному шарі. На думку авторів, рівноважний стан буде досягнутий при виході роботи анаеробного фільтру на технологічний режим.

Цикл роботи анаеробного фільтру складається з двох яскраво виражених фаз - заповнення і спорожнення. Фаза заповнення розпочинається з нижнього рівня стоків у баку сифона (рис. 2.3, а). В результаті постійного виділення біогазу і підвищення рівня вільної поверхні тиск в газовому об'ємі зростає. Досягши тиску величини відповідній глибині занурення патрубку в гідравлічному затворі починається відведення біогазу (рис. 2.3, б). У той час стічні води, що пройшли процес бродіння, постійно заповнюють бак сифона, до тих пір, поки не досягнуть верхнього рівня розташування сифонного трубопроводу [27, 28].

Фаза спорожнення починається, як тільки оброблений стік заповнить сифоновий трубопровід (рис. 2.3, в). Відбувається швидке спорожнення бака через сифоновий трубопровід, при пониженні рівня вільної поверхні у баку з фільтру починає поступати субстрат. У фільтр при цьому постійно завантажуються свіжий субстрат [27, 28].

В результаті зниження рівня стоків у фільтрі спостерігається пониження тиску в газовому об'ємі (рис. 2.3, г). Причому витрата сифонного відведення дорівнює витраті рідини через відповідний патрубок і набагато більше, ніж подання

стоків на обробку. Так спорожнення бака сифона викликає зміну швидкості руху стічних вод у фільтрі, але із закінченням фази спорожнення її величина назад знизитися до величини забезпечуваним поданням насоса у фільтр (рис. 2.3, д - а). Далі цикл роботи анаеробного фільтру з сифоновим відведенням повторюється [37, 38].

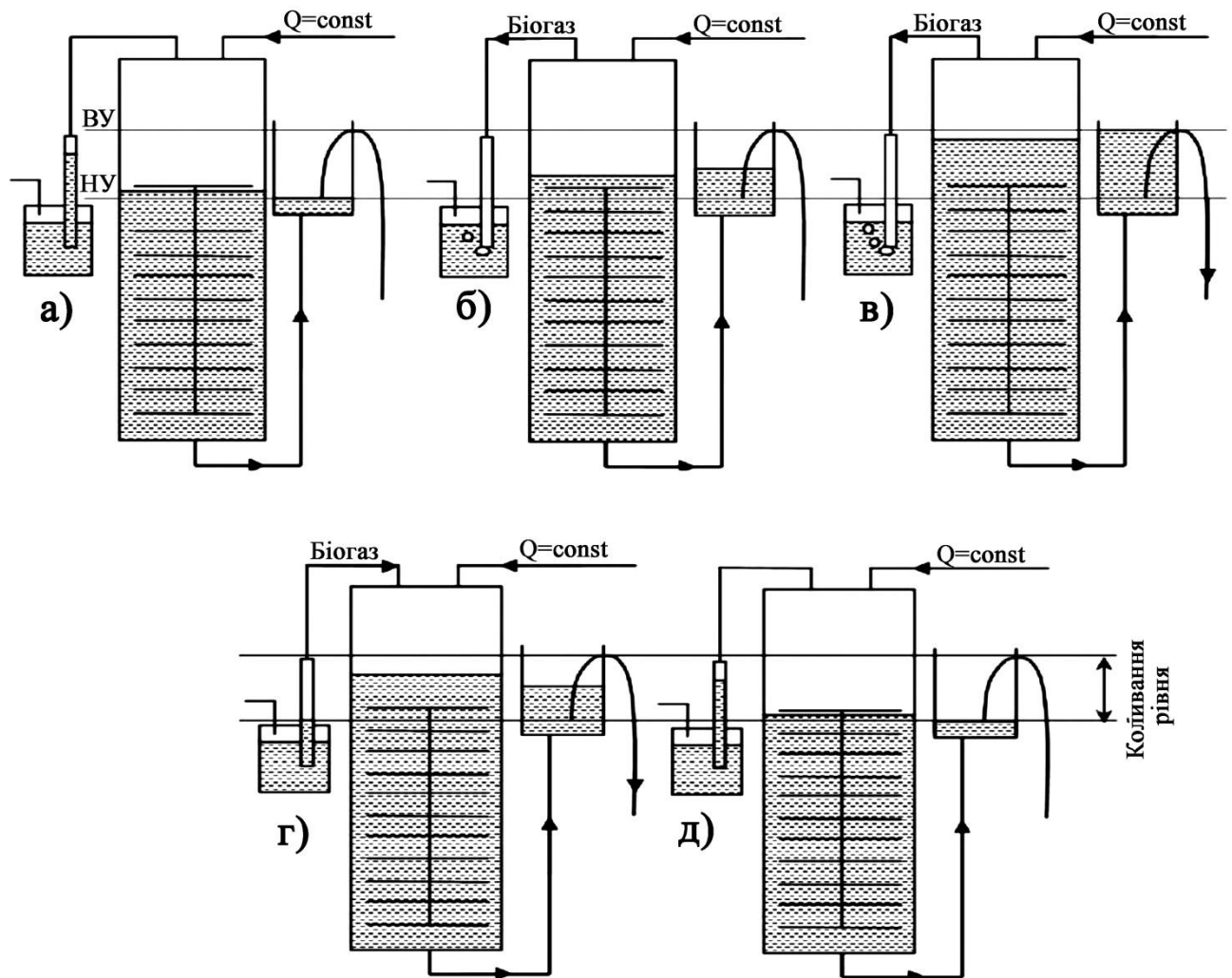


Рис. 2.3 - Цикл роботи анаеробного фільтру

2.2 Гідравлічна модель анаеробного фільтру з циклічним обуренням за рахунок зміни швидкості руху вільної поверхні рідини

У запропонованій конструкції анаеробного фільтру з сифоновим відведенням гідродинамічні обурення, що інтенсифікують процес анаеробного

зброджування субстрату відбуваються за рахунок зміни швидкості руху вільної поверхні стоків у фільтрі [28].

Анаеробний фільтр є вертикальним реактором з підведенням тваринницьких стоків у верхню частину (рис. 2.4). Реактор на 80 - 85 % заповнений іммобілізаційною поверхнею для прикріплення мікроорганізмів (W_p - робочий об'єм фільтру) і на 15 - 20% газовим об'ємом (W_g - газовий об'єм фільтру), який заповнюється біогазом, що виділився в процесі бродіння. Біогаз, що виділяється в процесі метанового бродіння, заповнює верхню частину реактора.

Оброблені стічні води відводяться з нижньої частини фільтру по відповідному патрубку і поступають у бак сифона. Відведення біогазу здійснюється з верхньої частини реактора через гідравлічний затвор.

Конструктивне оформлення анаеробного фільтру з сифоновим відведенням забезпечує зміну швидкості, і коливання рівня вільної поверхні субстрату у фільтрі, тим самим забезпечує гідродинамічне обурення.

У анаеробному фільтрі з сифоновим відведенням цикл обурення оброблених стоків складається з двох фаз: заповнення і спорожнення. Фаза заповнення характеризується підвищенням рівня рідини, як у фільтрі, так і у баку сифона. Швидкість руху рідини в робочому об'ємі фільтру мала і практично постійна, тиск в газовому об'ємі поступово підвищується до величини, визначуваної заввишки занурення трубки в гідравлічному затворі. Фаза спорожнення починається з рухом рідини в сифоновому трубопроводі, характеризується різким падінням рівня вільної поверхні рідини у баку сифона. Рух вільної поверхні субстрату в робочому об'ємі фільтру знижується з меншою інтенсивністю і з деяким запізнюванням, оскільки тиск в газовому об'ємі різко зменшується. Цикл закінчується з припиненням роботи сифонного відведення. Рівень рідини в робочому об'ємі анаеробного фільтру і бака сифона має два положення: верхнє і нижнє.

У фазі спорожнення фільтру відбуваються циклічні обурення, тобто перехід

від верхнього положення до нижнього. В процесі спорожнення знижується тиск в газовому об'ємі анаеробного фільтру, що призводить до залпового виділення біогазу зі зброджуваної маси, а пониження рівня вільної поверхні субстрату сприяє оновленню меж рідкою і твердою фаз. Чим швидше знижуватиметься рівень, тим інтенсивніше відбуватиметься оновлення.

Біогаз приймається як ідеальний газ, що підкоряється рівнянню Менделеева-Клайперона, оскільки помітні відхилення властивостей реальних газів від властивостей ідеального газу спостерігаються при низьких температурах і високих тисках, а також при високих температурах, коли відбувається дисоціація молекул. Оброблені тваринницькі стоки приймаємо як ньютонівську рідину, що не змінює своїх характеристик з часом, оскільки вологість оброблених тваринницьких стоків досить висока і за своїми властивостями близька до властивостей води.

Подання субстрату в реактор здійснюється безперервно, отже витрата субстрату $Q_{ж}$ - величина постійна. Конструктивні розміри реактора приймаємо постійними.

Вихід біогазу $Q_{г}$ - величина змінна, залежить від великої кількості чинників. Для складання гідравлічної моделі анаеробного фільтру з сифоновим відведенням використовуватимемо його середнє значення.

Для нормального протікання процесу анаеробного зброджування органічної речовини потрібно підтримку постійної температури, отже, стан системи ізотермічний ($T = const$).

Для оцінки обурень в цій фазі приймається наступний параметр - швидкість руху вільної поверхні стоків у фільтрі v_{ϕ} [27].

Швидкість руху вільної поверхні стоків в анаеробному фільтрі можна визначити, склавши рівняння балансу об'ємної витрати. Для цього розглянемо фазу спорожнення (рис. 2.4). Відлік координат проводиться від площини порівняння 0-0, проведеною через крайнє нижнє положення, патрубкa, що відводить шлам. Рух рідини в сифоновій трубці є несталим, оскільки натиск Z_1 ;

змінюється з часом, а, отже, міняється з часом швидкість і витрата витікаючої рідини. Припустимо, що рівень рідини у фільтрі і баку в даний момент часу знаходяться відповідно на висоті Z_1 і Z_2 . За нескінченно малий проміжок часу спорожнення dt_{on} рівень у фільтрі змінюється на dZ_1 , а в сифоні на dZ_2 , течію рідини можна вважати таким, що встановилося. За цей час з сифона витече об'єм рідини $Q_c dt_{on}$, в той же час у бак з фільтру притече об'єм рідини $Q_{np} dt_{on}$. У свою чергу у фільтр постійно поступає об'єм рідини $Q_{nod} dt_{on}$, в той же час з фільтру витікає об'єм рідини $Q_{внт} dt_{on}$. Тоді об'єм рідини у баку сифонного відведення зміниться на величину dW_{ϕ} , а зміна об'єму рідини у фільтрі складе dW_{ϕ} [27, 36-38].

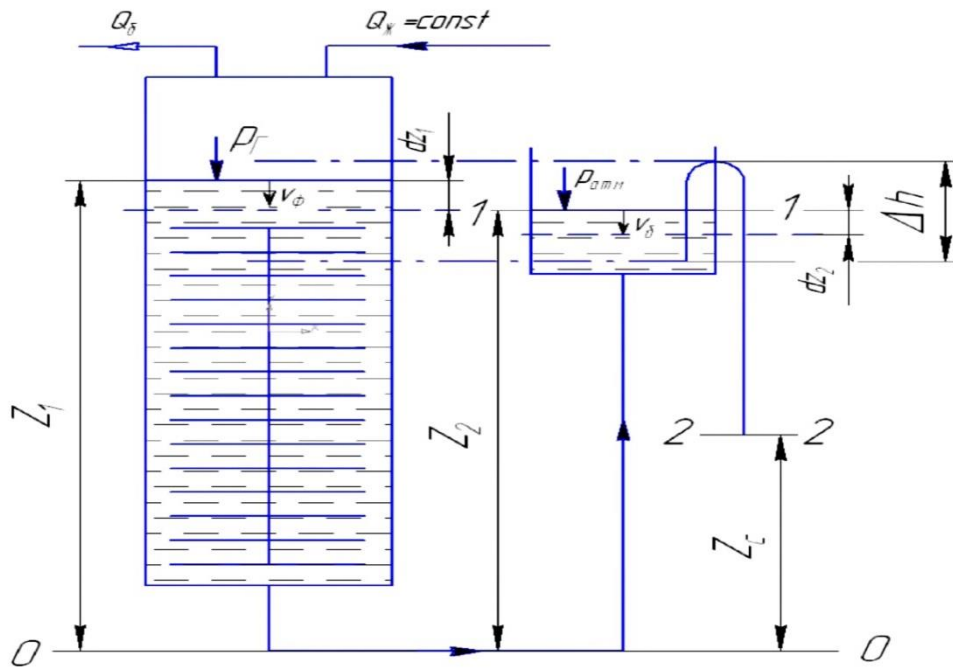


Рис. 2.4 Анаеробний фільтр: 0-0, 1-1, 2-2 - площини порівняння; $Q_{ж}$ - подання тваринницьких стоків; Q_6 - вихід біогазу; Z_1 - висота рідини у фільтрі; Z_2 - висота рідини у баку сифона; Z_c - висота розташування кінця сифонного трубопроводу; P_f - тиск на вільну поверхню, $P_{атм}$ - атмосферний тиск, dZ_1 - зміна рівня рідини у фільтрі, dZ_2 - зміна рівня рідини у баку сифона, V_{ϕ} - швидкість руху рідини у фільтрі, V_6 - швидкість руху рідини у баку сифона, Δh - коливання рівня рідини у баку сифона.

Баланс об'ємів цієї системи представиться у вигляді двох рівнянь:

$$\begin{aligned}
 dW_6 &= Q_c dt_{\text{оп}} - Q_{\text{пр}} dt_{\text{оп}} ; \\
 dW_\phi &= Q_{\text{выт}} dt_{\text{оп}} - Q_{\text{под}} dt_{\text{оп}}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

У приведеній системі рівнянь очевидним є, то що об'єм притікає з фільтру у бак $Q_{\text{пр}} dt_{\text{оп}}$ і об'єм витікаючий з фільтру у бак $Q_{\text{выт}} dt_{\text{оп}}$ рівні. Таким чином, можна прирівняти рівняння:

$$Q_c dt_{\text{оп}} - dW_6 = dW_\phi + Q_{\text{под}} dt_{\text{оп}} \tag{2.2}$$

Зміна об'єму бака:

$$dW_6 = \omega_6 dz_2 \tag{2.3}$$

де ω_6 - площа живого перерізу сифона, м².

Зміна об'єму фільтру:

$$dW_\phi = \omega_\phi dz_1 \tag{2.4}$$

де ω_ϕ - площа живого перерізу фільтру, м².

Підставивши рівняння (2.3) і (2.4) в рівняння (2.2), і вирішуючи його відносно зміни висоти dz_1 отримаємо:

$$dz_1 = \frac{Q_c dt_{\text{оп}} - Q_{\text{под}} dt_{\text{оп}} - \omega_6 dz_2}{\omega_\phi} \tag{2.5}$$

Швидкість руху вільної поверхні у фільтрі dv_ϕ визначимо поділивши рівняння (2.5) на час спорожнення $dt_{\text{оп}}$

$$dv_\phi = \frac{dz_1}{dt_{\text{оп}}} = \frac{dQ_c - Q_{\text{под}} - \omega_6 dv_6}{\omega_\phi} \tag{2.6}$$

де $dv_6 = \frac{dz_2}{dt_{\text{оп}}}$ - швидкість руху вільної поверхні стоків у баку сифона, м/с.

Якщо розглядати увесь період спорожнення, то рух рідини є несталим, тому ми в рівняння (2.6) вказали на зміну витрати сифонного відведення:

$$dQ_c = \omega_c dv_c \tag{2.7}$$

де ω_c - площа живого перерізу сифонного трубопроводу, м²;

dv_c - швидкість руху в сифоновому трубопроводі, м/с.

Рівняння (2.7) у функціональному виді запишеться як:

$$dv_{\phi} = f(dQ_c; Q_{\text{под}}; \omega_6; dv_6; \omega_{\phi}) = f(dQ_c; Dz; l_{\phi}; d_6; d_{\phi}) \quad (2.8)$$

де Dz - доза завантаження %;

l_{ϕ} - довжина робочої частини фільтру, м;

d_6 - діаметр бака сифона, м;

d_{ϕ} - діаметр фільтру, м.

Для визначення витрати сифона скористаємося рівнянням Бернуллі:

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2q} + \frac{p_1}{\rho q} + z_1 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2q} + \frac{p_2}{\rho q} + z_2 + h_w + h_i \quad (2.9)$$

де α_1, α_2 - коректив кінетичної енергії (коефіцієнт Коріоліса);

v_1, v_2 - середні швидкості руху потоку рідини в перерізах, м/с;

p_1, p_2 - середні абсолютні тиски в перерізах, Па;

ρ - щільність тваринницьких стоків, кг/м³;

q - прискорення вільного падіння, м/с²;

z_1, z_2 - геометричні висоти центру тяжіння відповідних перерізів, м;

h_w - сумарні втрати натиску, м;

h_i - інерційний натиск, м.

Сумарні втрати натиску визначаються як [125]:

$$h_w = \lambda \frac{l_c v_c^2}{d_c 2q} + \sum \xi_c \frac{v_c^2}{2q} \quad (2.10)$$

де λ - коефіцієнт гідравлічних опорів тертя сифонового трубопроводу;

l_c - довжина сифонового трубопроводу, м;

d_c - діаметр сифонового трубопроводу, м;

v_c - середня швидкість руху рідини в сифоновому трубопроводі, м/с;

$\sum \xi_c$ - коефіцієнт місцевих опорів системи.

Інерційний натиск враховує витрати на подолання локальної сили інерції одиниці ваги рідини і визначається вираженням [125]:

$$h_i = \frac{\alpha_0}{q} \int_{s_2}^{s_1} \frac{\partial v}{\partial t} ds \quad (2.11)$$

де α_0 - коректив кількості руху;

s - координата шляху, м.

Приймаємо переріз 1-1 співпадаюче з вільною поверхнею рідини у баку сифона, а переріз 2-2 - співпадаюче з кінцем сифонного трубопроводу (рис. 2.4).

Тоді: $v_1 = v_0$, $v_2 = v_c$, $p_1 = p_{\text{атм}}$, $p_2 = p_{\text{атм}}$, $z_1 = z_z$, $z_2 = z_c$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_0 = 1$, рівняння (2.9) виглядатиме таким чином:

$$\frac{v_0^2}{2q} + z_2 = \frac{v_c^2}{2q} + z_c + \lambda \frac{l_c}{d_c} \frac{v_c^2}{2q} + \sum \xi_c \frac{v_c^2}{2q} + \frac{1}{q} \int_{s_2}^{s_1} \frac{\partial v}{\partial t} ds \quad (2.12)$$

Скориставшись рівнянням нерозривності:

$$Q = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = v_n \omega_n = \text{const} \quad (2.13)$$

визначимо витрату сифона:

$$Q_c = \sqrt{\frac{1}{1 + \lambda \frac{l_c}{d_c} + \sum \xi_c}} * \omega_c * \left[v_0 + \sqrt{2gH} - \sqrt{2l_c \frac{dv_c}{dt}} \right] \quad (2.14)$$

де $H = z_2 - z_c$ - натиск сифона, м;

$\sqrt{2l_c \frac{dv_c}{dt}} = \sqrt{2 \int_{s_2}^{s_1} \frac{\partial v}{\partial t} ds}$ - інерційна швидкість, де не враховані зміни при русі

рідини у баку сифона (зважаючи на їх незначність) і прийнято, що переріз сифонного трубопроводу постійний по довжині і є циліндричним [125].

У функціональному виді формула (2.15) визначається як

$$\begin{aligned} Q_c &= f \left[\lambda; l_c; d_c; \sum \xi_c; v_0; H; \frac{dv_c}{dt} \right] = \\ &= f \left[T; W; K; l_c; d_c; \sum \xi_c; d_0; H; \frac{dv_c}{dt} \right] \end{aligned} \quad (2.15)$$

де T - температура стоків, °C;

W - вологість стоків %;

K - хімічний склад стоків.

З аналізу рівнянь (2.8) і (2.15) визначимо функціональну залежність швидкості руху вільної поверхні стоків у фільтрі:

$$v_{\phi} = f \left[Dz; l_{\phi}; d_{\sigma}; d_{\phi}; T; W; K; l_c; d_c; \sum \xi_c; H; \frac{dv_c}{dt} \right] \quad (2.16)$$

Отримана функціональна залежність дозволяє зробити, наступні висновки:

- Швидкість руху вільної поверхні стоків у фільтрі залежить від фізико-хімічних характеристик субстрату і технологічних параметрів анаеробного зброджування ($Dz; T; W; K$). а так само конструктивних особливостей установки ($l_{\phi}; d_{\sigma}; d_{\phi}; l_c; d_c; \sum \xi_c; H$).

- Найбільш технологічними чинниками для управління швидкістю є: $Dz; d_{\sigma}; d_{\phi}; d_c; H$. Причому збільшення $d_c; H$ сприятимуть підвищенню швидкості, а збільшення $Dz; d_{\sigma}; d_{\phi}$ знижуватимуть її.

- Величина обурення залежить від висоти занурення трубки в гідравлічному затворі; рівня колювання рідини у баку сифона; стосунки площі перерізу фільтру до площі перерізу бака сифона; натиску сифона і подання рідини в анаеробний фільтр.

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Загальна методика проведення експериментальних досліджень

Головною метою експериментальних досліджень було підтвердження раніше проведених теоретичних досліджень залежності величини гідродинамічних обурень в анаеробному фільтрі і його вплив на вихід біогазу, а також визначення міри очищення гнойових стоків. В результаті необхідно визначити раціональні конструктивні розміри анаеробного фільтру з сифоновим відведенням, а так само технологічні параметри його роботи з необхідною ефективністю [32].

Експериментальні дослідження проводилися по наступних основних етапах [32, 33]:

1. Проведення досліджень на моделюючій демонстраційній установці;
2. Проведення досліджень на лабораторній виробничій установці по метановому зброджуванню.

На першому етапі проводилося моделювання гідродинамічного обурення на моделюючій демонстраційній установці. Ця установка дозволяє робити візуальне і приладове спостереження за процесом створення гідродинамічного обурення анаеробного фільтру. Метою цього етапу експериментальних досліджень було визначення чинників, що впливають на процес створення обурення в моделюючій демонстраційній установці [32, 36].

На другому етапі експериментальних досліджень проводилося анаеробне зброджування. Приведена процедура планування експерименту по метановому зброджуванню з метою виявлення взаємозв'язку впливаючих чинників на оцінні параметри процесу, також визначення міри впливу гідродинамічних обурень на ефективність роботи анаеробного фільтру [32, 36].

3.2 Методика проведення і планування експериментальних досліджень на моделюючій демонстраційній установці

У запропонованій конструкції анаеробного фільтру з сифоновим відведенням необхідне обурення створюється за рахунок зміни швидкості руху вільної поверхні рідини в метантенку [38].

На створення гідродинамічних обурень в анаеробному фільтрі робить вплив велика кількість чинників: технологічні (вихід біогазу, подання субстрату та ін.) і конструктивні чинники (діаметр анаеробного фільтру, діаметр бака сифона, висота бака сифона, діаметр сифонного трубопроводу та ін.).

В результаті проведення теоретичних досліджень [38] і вивчення апріорної інформації прийнято рішення варіювання наступними чинниками [32, 34]:

1. X_{1M} - висота занурення трубки в гідравлічному затворі, підтримує задане коливання тиску в газовому об'ємі фільтру, забезпечує анаеробність при відведенні біогазу;
2. X_{2M} - рівень коливання рідини у баку сифона;
3. X_{3M} - відношення площі перерізу фільтру до площі перерізу бака сифона;
4. X_{4M} - подання рідини в анаеробний фільтр;
5. X_{5M} - натиск сифона.

Область визначення чинників задавалася виходячи з передбачуваного режиму роботи анаеробного фільтру, раніше проведеними теоретичними дослідженнями і за літературними джерелами (таблиця 3.1) [26, 32, 36].

Характеристика чинників, включених в експеримент на моделюючій
демонстраційній установці

Номер чинника	Назва	Область визначення	Точність, %
1 - X_{1M}	h_3 - висота занурення трубки в гідравлічному затворі, 10^{-3} м	0-200	1
2 - X_{2M}	Δh - рівень коливання рідини у баку сифона, 10^{-3} м	0 - 300	1
3 - X_{3M}	ω_f / ω_{bc} - відношення площі перерізу фільтру до площі перерізу бака сифона	0- 1	1
4 - X_{4M}	Q_{oc} - подання рідини в анаеробний фільтр, 10^{-9} м ³ /с	0- 1	5
5 - X_{5M}	h - натиск сифона, 10^{-3} м	0-500	3

Для визначення величини впливу чинників на процес створення гідродинамічного обурення прийнято рішення вибору основних вимірюваних параметрів, що характеризують величину обурень в цій конструкції аналогової моделі анаеробного фільтру, до них відносяться [26, 32, 34]:

1. $t_{оп}$ - час фази спорожнення, с;
2. $t_{зап}$ - час фази заповнення, с;
3. Δp - зміна тиску на вільній поверхні, Па;
4. $\Delta h_{св.пов.}$ - зміна висоти вільної поверхні рідини у фільтрі, 10^{-3} м.

Успішне проведення експериментального дослідження залежить від ретельного планування експерименту. Одним з найважливіших аспектів планування експерименту є процедура визначення і вибору параметрів, що характеризують процес відповідно до конкретної мети [9-11]. До параметрів пред'являються вимоги їх чіткої логічної інтерпретації, допущення кількісної або, можливо, якісної оцінки [9, 10].

Основними оцінними параметрами, які характеризують величину і характер

циклічних гідродинамічних обурень, прийняті [26, 32, 34, 36]:

- $Y_{1M}(\Delta p \text{ (Па)})$ - зміна тиску в газовому об'ємі анаеробного фільтру, характеризує величину обурюючої дії і дозволяє оцінити інтенсивність вивільнення бульбашок біогазу:

$$\Delta p = \rho \cdot q \cdot (h_{\text{изб}} + h_{\text{вак}}) \quad (3.1)$$

де ρ - щільність рідини, кг/м³;

q - прискорення вільного падіння, м/с²;

$h_{\text{изб}}$ - висота надмірного тиску по свідченню U- образного манометра, м;

$h_{\text{вак}}$ - висота вакуум метричного тиску по свідченню U- образного манометра,

м.

- $Y_{2M}(V \text{ (м/с)})$ - швидкість руху вільної поверхні рідини у фільтрі, характеризує величину створюваного гідродинамічного обурення, дозволяє оцінити інтенсивність конвективного масопереносу за рахунок руху зброджуваної рідини:

$$V = \frac{(h_{\text{max}} - h_{\text{min}})}{t_{\text{оп}}} = \frac{\Delta h_{\text{св.пов.}}}{t_{\text{оп}}} \quad (3.2)$$

де h_{max} - максимальна відмітка коливання вільної поверхні у фільтрі, м;

h_{min} - мінімальна відмітка коливання вільної поверхні у фільтрі, після закінчення фази спорожнення, м.

- $Y_{3M}(t_{\text{цикла}} \text{ (с)})$ - тривалість циклу роботи анаеробного фільтру, характеризує відрізок часу повторності фаз:

$$t_{\text{цикла}} = (t_{\text{оп}} + t_{\text{зап}}) \quad (3.3)$$

- $Y_{4M}(n \text{ (циклов/сутки)})$ - частота протікання циклів показує періодичність обурень [35]:

$$n = \frac{24 * 3600}{t_{\text{цикла}}} \quad (3.4)$$

Оцінні параметри, що визначають гідродинамічну характеристику анаеробного фільтру з сифоновим відведенням зведені в таблицю 3.2. Згідно з теоретичними розробками і літературними джерелами область визначення оцінних параметрів задавалася виходячи з передбачуваного режиму роботи анаеробного фільтру з сифоновим відведенням [26, 32, 34].

Таблиця 3.2

Характеристика оцінних параметрів демонстраційної установки
анаеробного фільтру

Номер параметра	Назва	Область визначення	Точність, %
1 - Y_{1M}	Δp - зміна тиску в газовому об'ємі фільтру, Па	0-3000	1
2 - Y_{2M}	V - швидкість руху вільної поверхні рідини, м/с	0-0,1	5
3 - Y_{3M}	$t_{циклов}$ - тривалість циклу обурення в анаеробному фільтрі, сек.	0-3000	0,5
4 - Y_{4M}	n - частота протікання циклів, циклів/добу	0-500	0,5

При плануванні експерименту з метою виявлення значимих чинників, що визначають величину обурюючих дій і встановлення взаємозв'язків між ними, прийнято рішення проводити дослідження на двох рівнях - максимальному (+1) і мінімальному (- 1) використанням повного факторного експерименту 2^5 , з проведенням 32 дослідів. При п'ятикратній повторності дослідів, їх загальна кількість зростає до 160. Прийнято рішення про мінімізацію кількості дослідів, використовуючи дробовий факторний експеримент. План - матриця з восьми дослідів, для п'ятифакторного планування експерименту це буде чверть реплікою - 2^{5-2} , в натуральних і кодованих величинах приведена в таблиці 3.3 [26, 32, 34, 36].

План-матриця експерименту

№ з/п	X_{1M}		X_{2M}		X_{3M}		X_{4M}		X_{5M}		Порядок випадкової реалізації
	код	натури	код	натури	код	натури	код	натури	код	натури	
1	-	5	-	14	-	1:1	+	0,7	+	25	2
2	+	10	-	14	-	1:1	-	0,5	-	15	8
3	-	5	+	20	-	1:1	-	0,5	+	25	1
4	+	10	+	20	-	1:1	+	0,7	-	15	4
5	-	5	-	14	+	1:5	+	0,7	-	15	3
6	+	10	-	14	+	1:5	-	0,5	+	25	7
7	-	5	+	20	+	1:5	-	0,5	-	15	6
8	+	10	+	20	+	1:5	+	0,7	+	25	5

Для того, щоб виключити вплив систематичних помилок, викликаних зовнішніми умовами, досліди рандомізовані в часі, при цьому використали таблицю випадкових чисел [9].

Експериментальна моделююча демонстраційна установка дозволяє провести візуальне спостереження процесу створення обурення в анаеробному фільтрі з імітацією подання субстрату і виділення біогазу. Схема установки представлена на рис. 3.1 [32, 34].

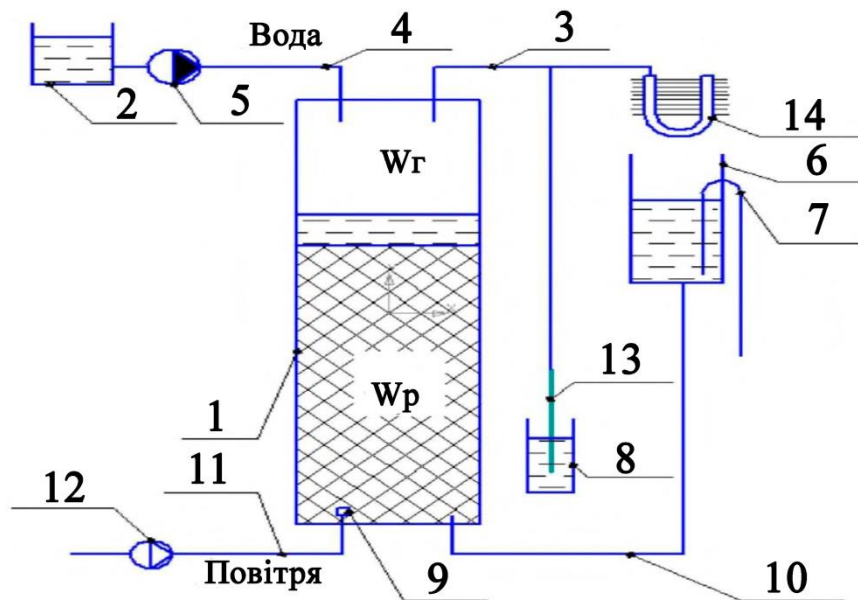


Рис. 3.1 Схема моделюючої демонстраційної установки: 1 - скляна труба; 2 - місткість для рідини; 3 - повітряний патрубок, що підводить; 4 - рідинний патрубок, що підводить; 5, 12 - шлангові насоси; 6 - бак сифона; 7 - сифонний трубопровід; 8 - гідравлічний затвор; 9 - фільтр дірчастий; 10 - рідинний патрубок, що відводить; 11 - газовий патрубок, що підводить; 13 - скляна трубка гідравлічного затвора; 14 - рідинний манометр; W_p - робочий об'єм; W_g - газовий об'єм.

Модель анаеробного фільтру є скляною трубою 1, закріплену вертикально з внутрішнім діаметром 35 мм і заввишки 2350 мм. Верхній і нижній торці труби герметично закриті гумовими пробками [32, 34].

У верхній пробці через штуцери встановлені: патрубок (4) підводить рідину і патрубок (3), що сполучає газовий об'єм з гідравлічним затвором (8) і рідинним манометром (14). У нижній пробці - газовий патрубок (11), що підводить, і патрубок для відведення рідини до сифона (10). Гідравлічний затвор (8) є прозорим вертикальним циліндром, заповненим рідиною, із зануреною в неї скляною трубкою (13). До патрубку (3) приєднаний манометр (14), ціна ділення якого складає 1 мм. Використовуючи основне рівняння гідростатики можна визначити надмірне або вакуумметр тиски в газовому об'ємі фільтру у будь-який момент часу. Як моделююча рідина використовувалася вода, а газу - атмосферне повітря. Сифонний пристрій складається з бака (6), виконаного з прозорого оргскла, і сифонного трубопроводу (7).

Подання рідини і газу здійснювалося за допомогою шлангових насосів (5) і (12). Перед початком дослідження була проведена тарировка насосів і побудовані графіки подання рідини і газу залежно від положення перемикача на насосі. Рідина до насоса (5) поступала з місткості 2, об'єм якої 5000 мл. На торці газового патрубку прикріплений дірчастий фільтр (9), який розділяє повітряний потік, що поступає від насоса (12), на дрібні бульбашки, імітуючи газовиділення.

Виміри положення вільної поверхні рідини здійснювалося з точністю до 1 мм. Тривалість як циклу в цілому, так і окремих його фаз, визначався за допомогою секундоміра з точністю до 0,01 сек.

На рис. 3.2 представлена фотографія моделюючої демонстраційної установки.

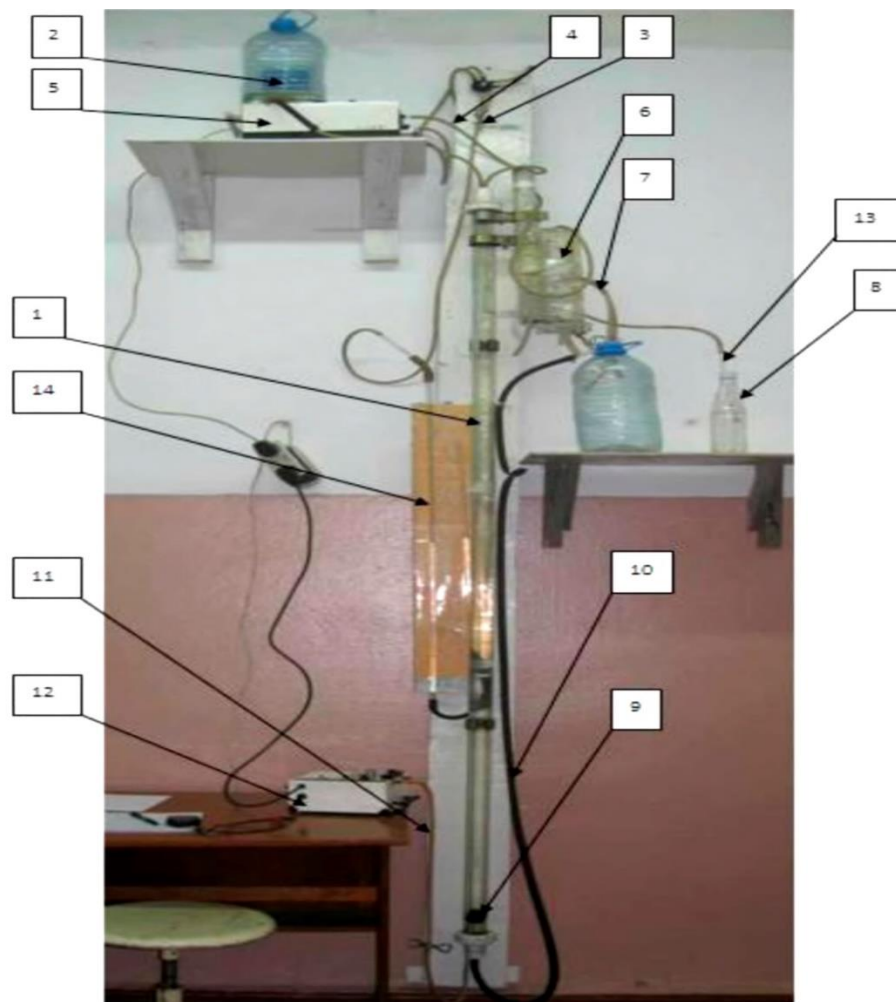


Рис. 3.2 - Моделююча демонстраційна установка з сифоновим відведенням

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Результати експерименту на моделюючій демонстраційній установці

Відповідно до складеного плану матриці планування (див. пункт 3.3, таблиця 3.6), виконаний експеримент на моделюючій демонстраційній установці, в результаті отримані значення вимірюваних показників (таблиця 4.1) і на підставі цих даних розраховані оцінні параметри (таблиця 4.2) [34].

Таблиця 4.1

Результати вимірюваних показників демонстраційної установки

№ досвіду	$t_{оп}$, с	$t_{зап}$, с	$h_{изб}$, мм вод. ст.	$h_{вак}$, мм вод. ст.	h_{min} , см	h_{max} , см
1	11,222	223,745	65	64	204	205
2	13,495	319,285	110	16	199,12	200,5
3	23,02	482,91	65	101,25	208,7	210,75
4	20,053	306,785	110	62	203	204,83
5	69,05	1562,59	65	55	203	204,67
6	46,84	1571,13	110	11	198	199,75
7	82,08	2078,57	65	113,5	207,8	209,5
8	71,99	1479,465	110	63,33	203	205,25

Таблиця 4.2

Розрахункові значення оцінних параметрів моделюючої установки

№ досвіду	$Y_{1M} - (\Delta p)$, Па		$Y_{2M} - (V)$, м/с		$Y_{3M} - (t_{цикла})$, с		$Y_{4M} - (n)$, циклів/добу	
	натури	кодир	натури	кодир	натури	кодир	натури	кодир
1	1265,49	-0,692	0,000891	0,677	234,967	-1	367,71	1
2	1236,06	-0,79	0,00102	1	332,78	-0,898	259,63	0,340
3	1630,9	0,581	0,00089	0,676	505,93	-0,718	170,77	-0,2018
4	1687,32	0,778	0,000912	0,73	326,838	-0,904	264,35	0,369
5	1177,2	-1	0,00024	-0,91	1631,64	0,450	52,953	-0,921
6	1187,01	-0,966	0,00037	-0,592	1617,97	0,436	53,4	-0,918
7	1751,08	1	0,000207	-1	2160,65	1	39,98	-1
8	1700,4	0,823	0,000312	-0,741	1551,45	0,367	55,689	-0,904

Обробку результатів, отриманих в ході експерименту на моделюючій демонстраційній установці проводили по методу множинної регресії із

застосуванням ЕОМ в програмі STATISTICA 6.0 (див. таблицю 4.3) [32].

Отримані регресійні моделі оцінних параметрів:

- зміна тиску в газовому об'ємі анаеробного фільтру:

$$Y_{1M} = 0,829X_{2M} \quad (4.1)$$

- швидкість руху вільної поверхні рідини:

$$Y_{2M} = 0,12X_{1M} - 0,79X_{3M} \quad (4.2)$$

- тривалість циклу обурення в анаеробному фільтрі:

$$Y_{3M} = -0,158 + 0,72X_{3M} \quad (4.3)$$

- частота протікання циклів в добу:

$$Y_{4M} = 0,656X_{3M} \quad (4.4)$$

де X_{1M} - висота занурення трубки в гідравлічному затворі;

X_{2M} - рівень коливання рідини у баку сифона;

X_{3M} - відношення площі перерізу фільтру до площі перерізу бака сифона;

X_{4M} - (подання рідини в анаеробний фільтр;

X_{5M} - натиск сифона.

Таблиця 4.3

Результати математико-статистичного аналізу в програмі STATISTICA 6.0

назва моделі	№ моделі	коефіцієнт де термінації	критерій Фішера		рівень значущості рівняння регресії	коефіцієнт регресії	Значення коефіцієнта регресії	t - критерій розрахунковий	розрахунковий рівень значущості
			розрахунковий	табличний					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
зміна тиску в газовому об'ємі анаеробного фільтру, Y_{1M}	4.1	0,97	217,31	5,987	0,00001	b_0	-0,034	-0,357	0,75
						b_1	-0,006	-0,064	0,95
						b_2	0,829	8,75	0,013
						b_3	-0,002	-0,02	0,98
						b_4	0,01 1	0,12	0,92

						b_5	-0,029	-0,31	0,78
швидкість руху вільної поверхні рідини, Y_{2M}	4.2	0,99	386,33	19,296	0,0025	b_0	-0,02	-1,12	0,37
						b_1	0,12	6,54	0,022
						b_2	-0,063	-3,46	0,074
						b_3	-0,79	-43,24	0,0005
						b_4	-0,042	-2,27	0,15
						b_5	0,026	1,4	0,296
тривалість циклу обурення в анаеробному фільтрі, Y_{3M}	4.3	0,98	93,96	19,296	0,01	b_0	-0,158	-4,6	0,044
						b_1	-0,09	-2,65	0,11
						b_2	0,094	2,74	0,11
						b_3	0,72	20,98	0,0002
						b_4	-0,11	-3,29	0,08
						b_5	-0,07	-2,04	0,178
частота протікання циклів в добу, Y_{4M}	4.4	0,8	28,32	5,987	0,002	b_0	-0,279	-1,99	0,185
						b_1	0,001	0,0089	0,99
						b_2	-0,15	-1,1	0,38
						b_3	-0,656	-4,67	0,043
						b_4	0,165	1,178	0,36
						b_5	0,023	0,166	0,88

У регресійних рівняннях змінні представлені в кодованій формі. Коефіцієнти множинної детерміації для регресійних моделей параметрів гідродинамічного обурення $\geq 0,8$. Перевірку адекватності отриманих рівнянь виконували за допомогою критерію Фішера, за результатами - моделі визнані адекватними. Оцінку значущості коефіцієнтів виконували за допомогою t-критерію Стьюдента при рівні значущості 0,05, значущість коефіцієнтів підтвердилася [9, 34].

У моделі зміни тиску в газовому об'ємі фільтру, рівняння 4.1, найбільший статистично значимий вплив робить чинник X_{2M} - рівень коливання рідини у

баку сифона, коефіцієнт регресії 0,829. Цей вплив пояснюється тим, що підвищення висоти коливання рідини у баку сифона підвищує величину падіння рівня рідини у фільтрі у фазі спорожнення, що позитивно діє на зміну тиску в газовому об'ємі фільтру. Це коливання тиску в газовому об'ємі повинне сприяти виділенню біогазу, спонукаючи його до лавиноподібної десорбції. Інші чинники впливають не статистично значимо. Чинник X_{1M} - висота занурення трубки в гідравлічному затворі, на практиці виявився не значимим, оскільки він визначає лише надмірний тиск початку вступу біогазу в гідравлічний затвор. На рис. 4.1 представлений графік залежності зміни тиску за часом для 1 досвіду. Тут виразно видно цикловий процес роботи установки, який розпочинається з тиску вакуумметра на початку фази заповнення. У міру подання рідини і газу у фільтр тиск зростає. З графіку видно, що швидкість зростання тиску є постійною величиною. Тиск зростає до моменту рівності його, величині тиску, визначуваного заввишки занурення трубки гідравлічного затвора в рідину (чинник X_{1M}). При рівності тисків робиться відведення газу, тиск в газовому об'ємі фільтру вирівнюється. Фаза заповнення триває до моменту початку спорожнення баку сифона, яке настає при висоті рідини у баку сифона вище за відмітку перегину сифонового трубопроводу. Початок фази спорожнення провокує різке падіння тиску в газовому об'ємі фільтру. Потім цикл повторюється, в цьому досвіді тривалість складала 234,9 секунд, фаза заповнення - 223,75 секунд і фаза спорожнення - 11,2 секунд.

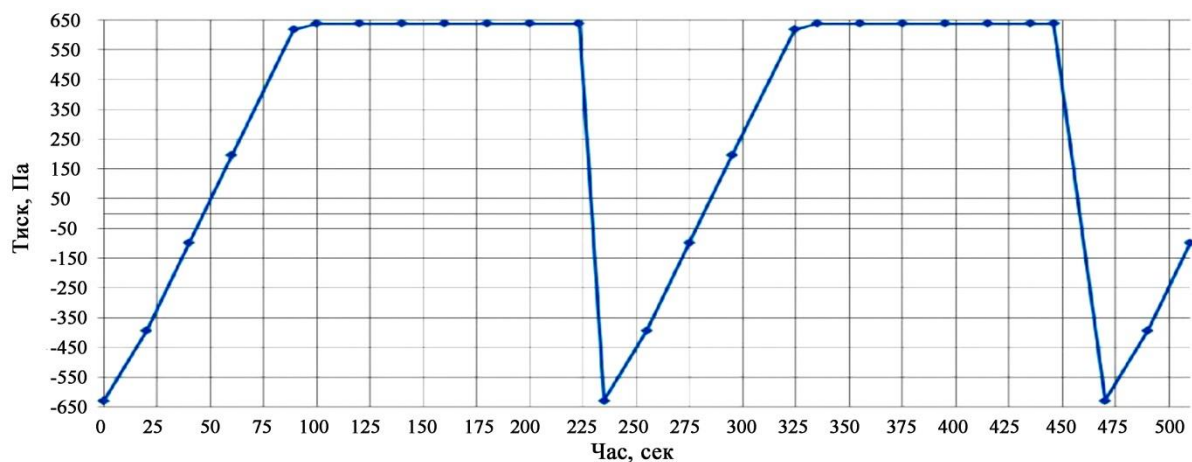


Рис. 4.1 - Графік зміни тиску в газовому об'ємі анаеробного фільтру

При виведенні рівняння 4.1 отримана математична модель зі змінними, представленими в натуральній формі:

- зміна тиску в газовому об'ємі фільтру, Па:

$$\Delta p = 105,8 + 79,33\Delta h \quad (4.5)$$

Поява вільного члена не є помилковою. В даному випадку воно визначає оцінний параметр в заданій області інтересу. Графічна інтерпретація рівняння 4.5, представлена на рис. 4.2.

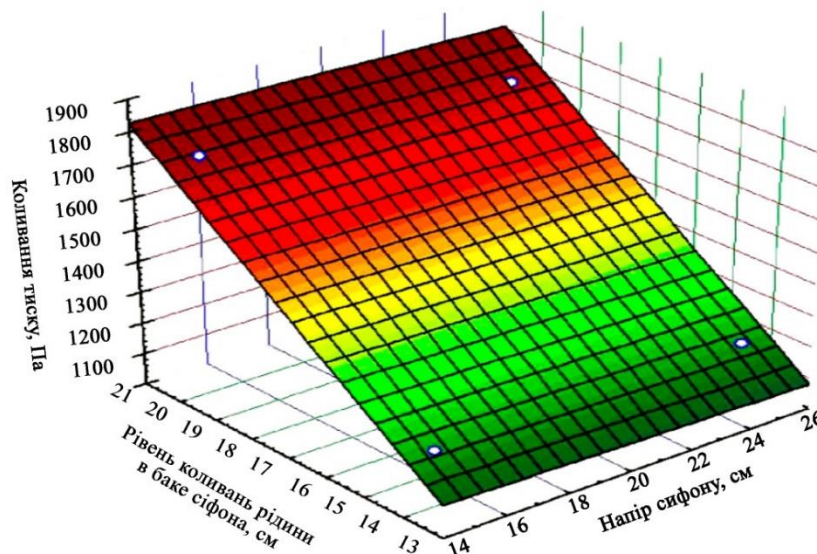


Рис. 4.2 Поверхня зміни тиску в газовому об'ємі рідини залежно від коливання рідини у баку сифона і натиску сифона.

На швидкість руху вільної поверхні рідини, рівняння 4.2, найбільший вплив робить чинник відношення площі перерізу фільтру до площі перерізу бака сифона. Цю залежність легко інтерпретувати, збільшення площі бака сифона веде до підвищення його об'єму, що веде до підвищення часу спорожнення бака сифона, так знижується швидкість руху вільної поверхні у баку сифона і швидкість руху вільної поверхні рідини, що корелює з нею, у фільтрі. Графік зміни швидкості вільної поверхні за часом циклу в 1 досвіді представлений на рис. 4.3. На графіці виразно видно, як рухається вільна поверхня рідини у фільтрі. Спостерігаються циклічні обурення за рахунок зміни швидкості руху при фазі спорожнення і на початку фази заповнення. Інтенсифікація процесу анаеробного зброджування досягатиметься саме за рахунок присутності позитивних і

негативних прискорень.

До статистично значимих чинників для рівняння 4.2, так само відноситься висота занурення трубки в гідравлічному затворі. Підвищення глибини занурення збільшує швидкість руху вільної поверхні, що пояснюється підвищенням надмірного тиску на вільній поверхні рідини у фільтрі. В результаті у кінці фази заповнення і на початку фази спорожнення перепад висот між рівнем рідини у фільтрі і баку сифона збільшується, що створює статичний натиск. Цей натиск потім реалізується в створення швидкісного натиску при спорожненні.

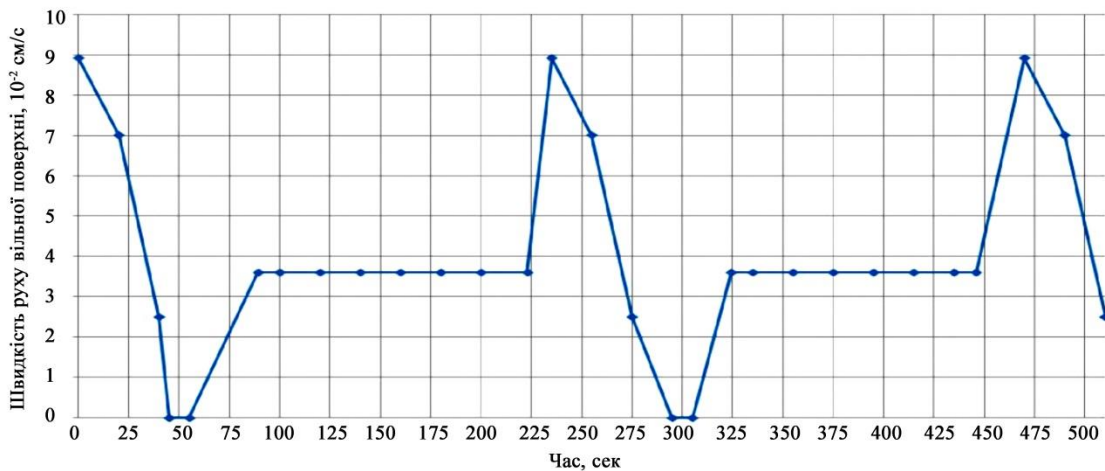


Рис. 4.3 Графік зміни швидкості руху вільної поверхні за часом циклу

При раскодировании рівняння 4.2 отримана наступна математична модель в натуральній формі:

швидкість руху вільної поверхні рідини у фільтрі, м/с:

$$V = 0,0182 + 0,00195h_3 + 0,0806\omega_\phi / \omega_{б.с.} \quad (4.6)$$

Графічна інтерпретація рівняння 4.6, представлена на рис. 4.4.

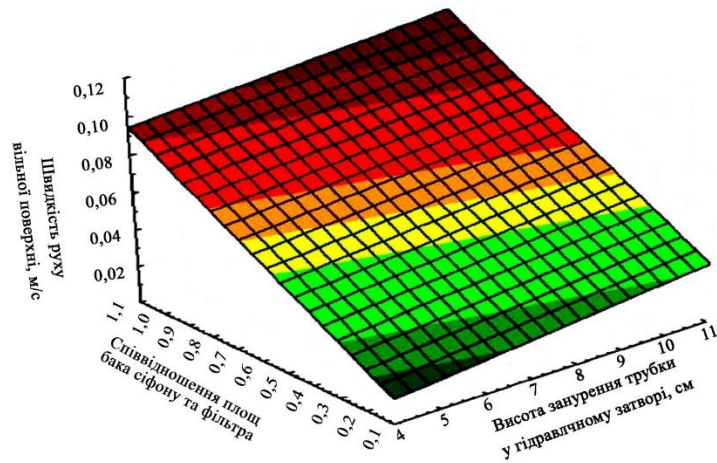


Рис. 4.4 Швидкість руху вільної поверхні залежно від співвідношення площ бака сифона і фільтра і висоти занурення трубки в гідравлічному затворі

У моделі тривалості циклу обурення в анаеробному фільтрі, рівняння 4.3, значимим чинником є відношення площі перерізу фільтра до площі перерізу бака сифона. Позитивний знак коефіцієнта регресії показує, що підвищення площі бака сифона веде до збільшення часу циклу. Це досягається за рахунок підвищення об'єму бака сифона, що веде до збільшення часу фази заповнення і фази спорожнення. Розкодоване рівняння, представлене в натуральній формі, має наступний вигляд:

- тривалість циклу обурення в анаеробному фільтрі, з:

$$t_{\text{цикла}} = 2761,85 - 1737,87 \omega_{\phi} / \omega_{\text{б.с.}} \quad (4.7)$$

Графічна залежність рівняння 4.7 представлена на рис. 4.5.

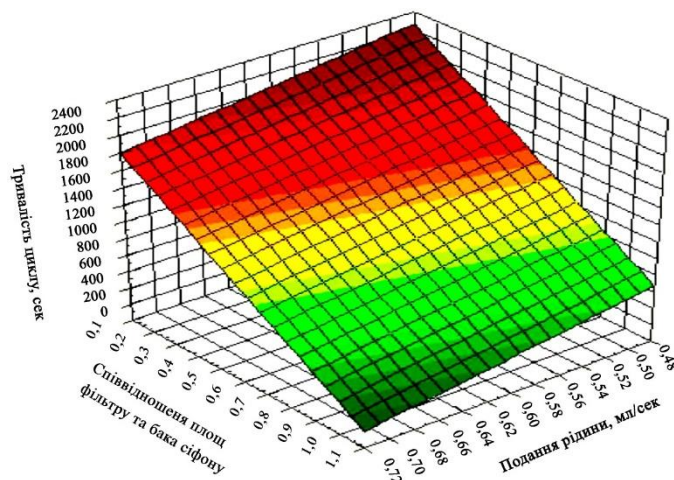


Рис. 4.5 Поверхня тривалості циклу від співвідношення площі фільтра до площі бака сифона і подання рідини.

На модель частоти протікання циклів в добу, рівняння 4.4, найбільший вплив робить чинник відношення площі перерізу фільтру до площі перерізу бака сифона, знак «-» вказує, що збільшення перерізу бака сифона веде до зниження оцінного параметра. Частота циклів залежить від часу протікання циклу обурення, а час циклу складається з часу фаз заповнення і спорожнення. Збільшення площі перерізу бака сифона веде до збільшення часу фаз і у результаті до підвищення тривалості усього циклу. Підвищення часу циклу обурення знижує кількість циклів в добу. Рівняння 4.4., виражене в натуральній формі виглядає таким чином:

- частота протікання циклів, циклів/добу:

$$n = -38,18 + 268,886 \omega_{\phi} / \omega_{б.с.} \quad (4.8)$$

Графічна залежність частоти циклів обурення представлена на рис. 4.6.

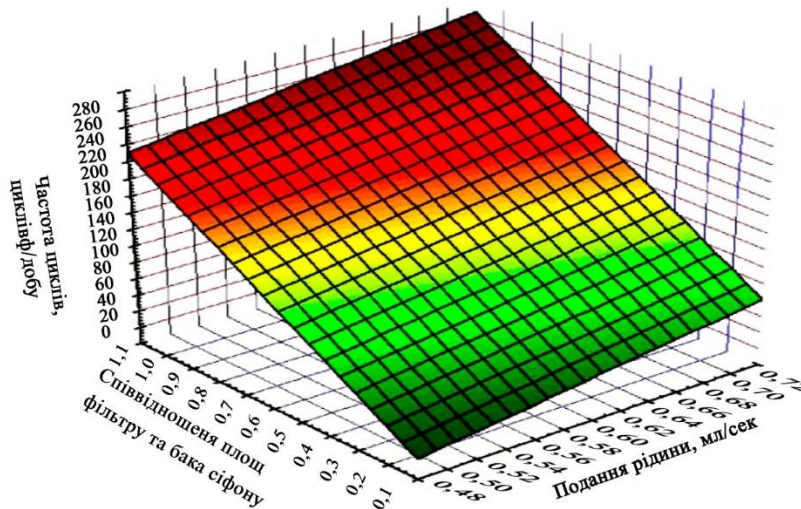


Рис. 4.6 Поверхня залежності частоти протікання циклів залежно від співвідношення площі фільтру і бака сифона, і подання рідини.

В результаті аналізу виконаних дослідів на моделюючій демонстраційній установці виявлено, що:

1) зі збільшенням значення чинника X_{1M} - висота занурення трубки в гідравлічному затворі, знижується величина коливання тиску в газовому об'ємі анаеробного фільтру, але при цьому збільшується швидкості руху вільної

поверхні рідини, а тривалість циклу скорочується, при цьому частота зростає. Статистично значимо чинник впливає лише на підвищення швидкості руху вільної поверхні, доля впливу у відповідність зі значенням коефіцієнта регресії - 0,12. На практиці цим чинником технологічно складно управляти. Звичайний тиск в гідравлічному затворі постійно, а висота занурення трубки не змінюється.

2) зі збільшенням значення чинника X_{2M} - рівень коливання рідини у баку сифона, підвищується величина зміни тиску в газовому об'ємі фільтру, але знижується швидкість руху вільної поверхні, а тривалість циклу зростає, а частота циклів обурення знижується. Статистично значимо чинник впливає лише на зміну тиску. Вибір раціонального значення чинника можливий тільки після проведення лабораторного виробничого експерименту. Необхідно визначити, що матиме вирішальне значення величина обурення (зміни тиску) або їх частота (частота циклів обурення).

3) найбільш вагомий і статистично значимий вплив на оцінні параметри робить чинник X_{3M} - співвідношення площі фільтру і бака сифона. Зменшення площі бака сифона відносно площі фільтру підвищуватиме величину обурень, т е. зміна тиску і швидкість. На інтенсивність обурень підвищення значення цього чинника впливає таким чином, тривалість циклу скорочується, а їх частота зростає. При проведенні експериментів на лабораторній виробничій установці зручніше використати співвідношення діаметрів фільтру і бака сифона, чим їх площі. Необхідно зрушити область інтересу у бік збільшення діаметру фільтру відносно бака сифона.

4) зі збільшенням значення чинника X_{4M} - подання рідини, зміна тиску в газовому об'ємі підвищується, а швидкість руху вільної поверхні у фільтрі знижується. Підвищення подання рідини збільшує тривалість циклу, відповідно до їх частота скорочується. Вплив цього чинника на усі оцінні параметри статистично не значимий. При проведенні лабораторних виробничих досліджень цей чинник матиме вирішальне технологічне значення, оскільки саме подання

стоків на обробку визначає дозу завантаження і впливає на вихід біогазу, а також на глибину розкладання органічної речовини. На цьому етапі можна стверджувати, що вплив подання рідини на величину і інтенсивність обурень не значимо.

5) збільшення чинника X_{5M} - натиск сифона, підвищує швидкість руху вільної поверхні у фільтрі, але зміна тиску в газовому об'ємі скорочується. Підвищення натиску сифона посилює інтенсивність обурень, тривалість циклу скорочується, при цьому частота циклів зростає. Але вплив цього чинника на оцінні параметри є не статистично значимим. При проведенні лабораторних виробничих досліджень цей чинник доведеться визначити постійною величиною і їм не варіювати.

Резюмуючи, визначимо набір чинників для лабораторних виробничих досліджень по анаеробному зброджуванню свинячих стоків, це чинники - подання стоків (доза завантаження), співвідношення діаметрів фільтру і бака сифона, і висота коливання рідини у баку сифона.

4.2 Запропонована технологія анаеробної переробки гнойових стоків свинарського підприємства

На підставі вивчення апріорної інформації, зроблених теоретичних і експериментальних досліджень розроблена технологічна лінія анаеробної переробки гнойових стоків (рис. 4.7).

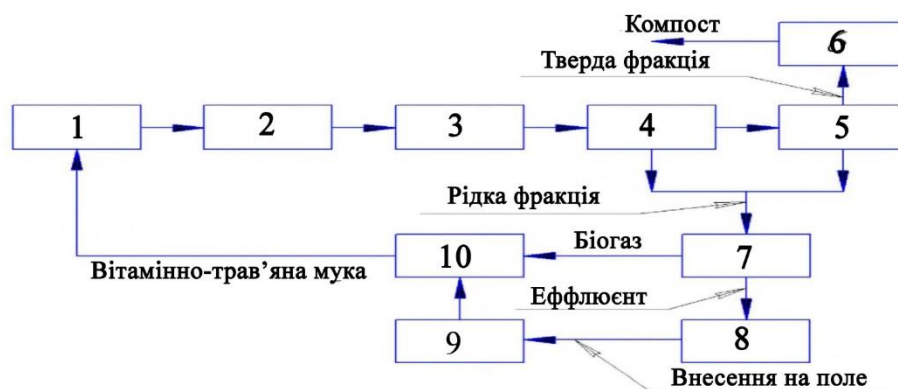


Рис. 4.7 Схема технологічної лінії анаеробної переробки гнойових стоків

свинарського комплексу: 1 - тваринницьке приміщення з гідросплавною системою гноєвидалення, основні і допоміжні майданчики; 2 - приймальний резервуар; 3 - насосна станція; 4 - пристрій для механічного розділення на фракції I ступеня; 5 - шнековий роздільник; 6 - анаеробний фільтр з сифоновим відведенням; 7 - мулові майданчики; 8 - обробіток сільськогосподарських культур; 9 - агрегат для приготування вітамінного борошна.

Для проміжного зберігання, накопичення і вирівнювання складу гнойових стоків, що поступають з тваринницьких приміщень, а також з усіх основних і допоміжних майданчиків 1, застосовують приймальні резервуари 2. Ці резервуари обладнані насосами для гомогенізації гною, далі маса перекачується за допомогою насосної станції 3 на перший ступінь механічного очищення - розділення. Для механічного розділення гнойових стоків на фракції застосовуються установки для відділення крупнодисперсних часток - дугові сита 4. Після розділення гнойових стоків рідка фракція поступає в анаеробний фільтр 6, тверда - на шнековий роздільник 5 (другий ступінь механічного очищення), далі тверда складова компостується. Після обробки рідкої фракції в анаеробних фільтрах продуктами зброджування є альтернативне газоподібне паливо - біогаз, високоефективне мінералізоване органічне добриво - еффлоент, а також технічно чиста вода - придатна для оборотного використання.

У літній час біогаз може використовуватися як джерело теплової енергії при роботі агрегату для приготування вітамінно-трав'яного борошна 9 [38,39].

У зимовий час біогаз може застосовуватися для опалювання допоміжних приміщень. Знезаражений рідкий гній, що поступає з анаеробного фільтру 6 зберігатися на мулових майданчиках 7 і вносять на заздалегідь підготовлені поля для зрошування. Внесення слід проводити при температурі повітря до мінус 10°C і висоті снігового покриву до 20 см [8].

Запропонована технологічна лінія є замкнутою: від збору і переробки гнойових стоків, до обробітку сільськогосподарських культур і приготування комбікормів [38, 39].

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що підвищення ефективності анаеробного збродження можливе за рахунок інтенсифікації масообмінних процесів. Аналіз методів і способів інтенсифікації виявив, що потрібне створення гідродинамічних обурень за рахунок зміни швидкості руху вільної поверхні рідини у фільтрі. Запропонована конструкція анаеробного фільтру з сифоновим відведенням, яка дозволяє створювати гідродинамічні обурення за рахунок зміни швидкості субстрату у фільтрі, що мають циклічний характер.

2. Розроблена гідравлічна модель фази спорожнення анаеробного фільтру з сифоновим відведенням. Виявлені найбільш значимі чинники, такі як - доза завантаження, діаметр фільтру і бака сифона, діаметр сифонного трубопроводу, натиск сифона, рівень коливання рідини у баку сифона.

3. Отримані регресійні моделі основних технологічних оцінних параметрів. Рациональне значення дози завантаження вибирається виходячи з цілей переробки, для підвищення виходу біогазу - збільшення ДЗ, а для підвищення міри розкладання - зменшення ДЗ; рівня коливання у баку сифона - 0,2 метра; співвідношення діаметрів фільтру і бака сифона - 1:1.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Эдер Б., Шульц Х. Биогазовые установки. Практическое пособие. К.: Зорг Украина, 2011. 268 с.
2. Клюс В. П., Четверик Г. О. Сумісне анаеробне бродіння гнойових відходів та конденсату газогенераторної установки. *Відновлювана енергетика*. К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2017. №3. С. 80-86.
3. Петрук В. Г., Васильківський І. В., Безвозюк І. І., Петрук Р. В., Турчик П. М. Природо-охоронні технології. Навчальний посібник. Ч.3.: Методи переробки осадів стічних вод. Вінниця: ВНТУ, 2013. 324 с.
4. Андреев В. А., Новиков М. Н., Лунин С. М. Использование навоза свиней на удобрения. М.: Росагроиздат. 1990. 94 с.
5. Герасименко В. Г. Біохімія продуктивності тварин. К.: Наука, 1976. 464 с.
6. Деталізовані норми годівлі сільськогосподарських тварин: довідник. за ред. М.Т. Ноздріна. К.: Урожай, 1991. 344с.
7. Бусенко О.Т., Столюк В.Д., Уманець В.Д. Технологія виробництва продукції тваринництва. К.: Аграрна освіта, 2001. 432 с.
8. Бусенко О. Т., Столюк В. Д., Могильний О. Й. Технологія виробництва продукції тваринництва. К.: Вища освіта, 2005. 496 с.
9. Відомчі норми технологічного проектування. ВНТП – АПК 01.05. Скотарські підприємства. Мінагрополітики України, К.: 2005.96 с.
10. Базарновой А. М., Морозовой В. Т. Руководство по клинической лабораторной диагностике. ч.з.: Клиническая биохимия. К.: Вища школа, 1986, 279 с.
11. Горячковский А. М. Справочное пособие по клинической биохимии. Одесса: ОКФА, 1994. 416 с.
12. Системи видалення, обробки, підготовки та використання гною ВНТП-АПК-09.06. Мінагрополітики України, К. 2006. 100 с.
13. Національна стратегія поводження з відходами для України. Додаток 5: Відходи сільського господарства Consortium Resources and Waste Advisory Group

Limited, UK and COWI A/S, Denmark

14. Жуков О. І., Монгайт І. Л., Родзіллер І. Д. Методи очищення виробничих стічних вод. М.: Хімія, 1996. С. 122
15. Славов В. П., Високос М. П. Зооекологія. К.: Аграрна наука, 1997. 376 с.
16. Хоменко В. І., Ковбасенко В. М., Оксамитний М. К. Ветеринарно-санітарна експертиза з основами технології і стандартизації продуктів тваринництва. К.: Сільгоспосвіта, 1995. 716 с.
17. Даниленко І. П., Микитюк П. В., Шуст І. І. Справочник по качеству продуктов животноводства. К.: Урожай, 1988. 184 с.
18. Іваненко Ф. В. Системи технологій у тваринництві: Навч. посіб. К.: КНЕУ, 2004. 380 с.
19. Маньківський А. Я., Скалецька Л. Ф. Технологія зберігання і переробки сільськогосподарської продукції: Навч. посіб. Ніжин, ВКП «Аспект», 1999. 371 с.
20. 5. Пабат В. О., Маньківський А. Я. Технологія продуктів забою тварин. К.: ТОВ «Оріон», 2000. 361 с.
21. Biogass - green energy. Process. Design. Energy supply. Environment. 2009 URL: <http://www.lemvigbiogas.com/Bio-gasPJJuk.pdf>. (дата звернення 09.09.2021).
22. Biogass Opportunities Roadmap. U.S. Department of Agriculture, U.S. Environmental Protection Agency, U.S. Department of Energy. 2014 URL: http://www.usda.gov/oce/reports/energy/Bio-gas_Opportunities_Roadmap_8-1-14.pdf. (дата звернення 09.09.2021).
23. Biogass. Handbook. 2009 URL: <http://www.lemvigbiogas.com/BiogassHandbook.pdf>. (дата звернення 09.09.2021).
24. Deublein, D. Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. 450 p.
25. Graaf D., Fendler R. Biogas production in Germany. Baltic Sea Region. Programme 2007-2013. Federal Environment Agency. 2010. 29 p.
26. Renewable Energies in Germany's Electricity Market I E. Bruns. Springer

Science Business Media B.V., 2011. 430 p.

27. <http://svynarstvo.in.ua/>

28. <http://agroua.net/animals/>

29. Калетнік Г. М., Скорук О. П., Браніцький Ю. Ю. Організаційно-економічні засади організації біопаливного виробництва у Вінницькій області на базі Уладово-Люлинецької ДСС. *Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2017. Випуск 5. С. 7-25.

30. Калетнік Г. М., Довгань Ю. В., Гончарук Г. С. Інвестиційно-інноваційне забезпечення вирощування біоенергетичних культур та виробництва біопалив. *Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2017. Випуск 1. С. 7-18.

31. Kaletnik H., Bulgakov V., Sevostianov I., Babyn I., Ivanovs S., Holovach I., Ihnatiev Ye. Theoretical Studies of the Vibration Process of the Dryer for the Waster of Food. *Rural sustainability research*. 2020. № 44(339). P. 32-45.

32. Калетнік Г. М., Скорук О. П., Токарчук Д. М. Організація і економіка використання біоресурсів: Підручник. Вінниця: ВНАУ, 2018. 297 с.

33. Альтернативна енергетика України: особливості функціонування і перспективи розвитку (Розділ 3: Біогаз): Колективна монографія [за ред. проф. Г. М. Калетніка]. Вінниця: «Едельвейс і К», 2012 р. 254 с. С. 110-197.

34. Біогазовий реактор. Патент на корисну модель, Україна, UA 127444. Любін М.В., Токарчук О.А., Яропуд В.М., Токарчук Д.М. Власник: ВНАУ. бюл.№14 від 25.07.18 р.

35. Біогазовий реактор. Патент на корисну модель, Україна, UA 133543, Гончарук І.В., Любін М.В., Яропуд В.М., Токарчук О.А., Токарчук Д.М. Власник: ВНАУ, бюл.№7 від 10.04.19 р.

36. Токарчук Д. М. Основні тенденції утворення та поводження з відходами аграрних підприємств. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2019. №4(44). С. 170-180.

37. Пришляк Н. В., Токарчук Д.М., Паламаренко Я.В. Забезпечення енергетичної та екологічної безпеки держави за рахунок біопалива з

біоенергетичних культур і відходів. Вінниця: ТОВ «Консоль», 2019. 336 с.

38. Токарчук Д.М. Інвестиційне забезпечення виробництва біогазу сільськогосподарськими підприємствами України. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2016. №12. С. 26-35.

39. Кириленко І.В., Токарчук Д.М. Ефективна організація використання відходів аграрних підприємств у формуванні енергетичної та екологічної безпеки. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2020. №2. С. 66-83.

40. Желих В. М., Фурдас Ю. В. Біогазові технології: теорія і практика : монографія ; М-во освіти і науки України, Нац ун-т "Львів політехніка". Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2015. 164 с.