

---

## Обґрунтування конструкції і технологічних параметрів мішалки метантенка

**Петро Петрович Краснолуцький**

Кафедра тракторів, автомобілів та енергетичних засобів, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID 0000-0003-2469-3190

### Для цитування цієї статті:

Краснолуцький Петро Петрович. Обґрунтування конструкції і технологічних параметрів мішалки метантенка. International Science Journal of Engineering & Agriculture Vol. 2, No. 3, 2023, pp. 26-37. doi:10.46299/j.isjea.20230203.04.

**Надійшла до редакції:** 21 травня 2023 р.; **Схвалено:** 26 травня 2023 р.;

**Опубліковано:** 01 червня 2023 р.

---

**Анотація:** У статті викладені результати початкових експериментальних досліджень мішалки метантенка біогазової установки з гідравлічною системою транспортування та змішування субстрату. На попередніх етапах наукової розробки було теоретично визначено склад і параметри гідравлічної системи, а також гідромеханічної мішалки за типом колеса Сегнера. Зважаючи на реальні матеріально-технічні можливості і у заборону проводити досліди із справжнім гноєм в умовах навчального закладу, пошукові експерименти проводились з моделлю мішалки на модельній рідині. Оскільки розміри моделі значно відрізняються від натурального зразка, було застосовано критерій подібності Фруда, який по суті є мірою співвідношення енергії масових сил до сил інерції потоку. Як визначальний розмір прийнято радіус лопаті. Тоді для натурального зразка  $l_1 = 1,5$  м; для моделі  $l_2 = 0,15$  м. За критерієм Фруда, для збереження подібності швидкість руху лопаті повинна бути 0,158 м/с, кутова швидкість обертання моделі 1,05 рад/с; потрібна частота обертання 10 хв-1. Для оцінки якості перемішування прийнято коефіцієнт варіації, а за ключовий компонент - концентрація сухої речовини. Тому у ході дослідів потрібно визначалась вологість 6 проб, взятих у трьох точках ємності на верхньому і на нижньому рівні. Результати аналізу отриманих даних показала, що майже у всіх варіантах встановлення лопаті концентрація сухої речовини більше у пробах з верхнього шару суміші. Тобто мішалка точно буде запобігати сегрегації (розшаруванню) суміші. Однак коефіцієнт варіації демонструє, що найкраща якість змішування (не більше 10) буде у тому випадку, коли кут відхилення лопаті знаходиться у діапазоні  $\beta_1 = -150 \dots +300$ . При куті понад 450 якість стає незадовільною, оскільки коефіцієнт варіації  $V_c > 20$ . Як свідчать одержані результати, зміна кута  $\beta_2$  сильніше впливає на якісні показники процесу. Припустима якість змішування забезпечується у діапазоні  $\beta_2 = -15 \dots +200$ , але найкращим цей показник є при  $\beta_2 = 0 \dots 100$ . При нахилі лопаті на кут понад -200 (тобто верхньою кромкою у напрямку руху) якість змішування стає незадовільною. З даних дослідів встановлено, що при розвороті лопаті проти ходу обертання потужність зменшується, очевидно, за рахунок зменшення площі міделя. Але водночас стрімко погіршується якість змішування. Точка мінімуму відповідає вертикальному положенні лопаті. У всіх інших варіантах потужність поступово зростає, очевидно через утворення зон підвищеного тиску. В цілому визначені нами теоретичним шляхом кути встановлення лопаті  $\beta_1 = 29^\circ$  та  $\beta_2 = 12^\circ$  близькі до таких, при яких забезпечується належна якість змішування при мінімумі споживаної потужності.

**Ключові слова:** біогаз, субстрат, метантенк, перемішування, мішалка, лопать, кут нахилу, модель.

---

## 1. Вступ

Останні десятиліття за кордоном швидко поширилось застосування біогазових установок, різноманітних за організацією технологічного процесу, розмірами та будовою основних елементів [1,2]. В Україні на сьогодні фактично застосовуються лише великогабаритні установки у складі біогазових заводів іноземного виробництва («Зорг Біогаз», Huo Long Biogas Ltd, та ін.), висока вартість яких робить їх недосяжними для переважної більшості агропромислових і переробних підприємств. Тому розробка і впровадження малогабаритних біогазових установок, доступних та достатньо ефективних для використання малими та середніми підприємствами, є важливим завданням як в економічному та екологічному аспекті, так і в аспекті посилення енергетичної безпеки країни [3]. Аналіз відомих технологій метанового бродіння показує, що однією із основних і важливих операцій є перемішування субстрату у метантенку, для чого у серійних установках застосовуються мішалки різних типів [4]. Очевидно, що просте масштабування системи перемішування субстрату метантенка великих розмірів понад 100 м<sup>3</sup> для значно меншої установки не є інженерно правильним. Отже, адаптація відомих конструкційних рішень мішалок до особливостей будови і роботи малогабаритних біогазових установок є актуальним [5].

## 2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є мішалка для перемішування субстрату у метантенку біогазової установки. Предмет дослідження – конструкційно-технологічні параметри пристрою та їх вплив на показники роботи.

## 3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів мішалки метантенка, які забезпечують належну якість перемішування при допустимих енергетичних витратах. Пов'язані із цим завдання дослідження: проаналізувати особливості процесу метанового зброджування органічних відходів, розглянути відомі технології гною та конструкції біогазових установок, обрати схему установки, найбільш доцільну в умовах малих і середніх тваринницьких ферм; теоретично обґрунтувати конструкцію та розрахувати основні параметри мішалки метантенка; виконати експериментальну перевірку лабораторного зразка запропонованої мішалки. Представлені нижче матеріали стосуються в основному останнього із зазначених завдань, але пояснити їх сутність без зв'язку із висвітленням результатів попередніх етапів досліджень неможливо, оскільки мішалка є частиною досить складної біотехнічної системи і повинна мати чітку відповідність іншим її елементам.

## 4. Аналіз літератури

Відомі дві поширені технології метанового зброджування. Послідовність операцій за класичною технологією така: підготовка сировини - завантаження метантенка - прогрівання та витримка субстрату з періодичним перемішуванням - розвантаження метантенка. За двофазними технологіями з попереднім гідролізом ( APS, IP-2-PAD, Linde-KCA) у складі установки є додаткова ємність для попереднього прогріву сировини і створення оптимальних умов для певної групи бактерій, важливих для початку бродіння. Послідовність операцій така: підготовка сировини - завантаження секції 1 - прогрівання та витримка субстрату з періодичним перемішуванням - завантаження секції 2 прогрівання та витримка субстрату з періодичним перемішуванням - розвантаження метантенка [6].

Двофазна технологія є більш ефективною як за показниками виходу біогазу, так і за можливістю ферментації і коферментації різних видів органічної сировини, у тому числі

таких, що важко зброджуються (пташиний послід та ін.) [6,7]. Тому нами було обрано за основу саме цю технологію і для неї скориговано типову методику розрахунку біогазової установки, а також запропоновано технологічну схему, яка дозволяє для перекачки субстрату від резервуара до резервуара і до шламосховища застосовувати одну насосну установку [8].

Для стабільної та ефективної роботи біогазової установки надзвичайно важливо забезпечити рівномірність розподілу у просторі реактора субстрату, груп бактерій і температури. Тому біогазова установка обов'язково комплектується пристроями для перемішування, яке слід проводити регулярно. Щоби не пошкодити бактеріальні плівки, рекомендується перемішування з невеликою швидкістю зміщення шарів субстрату (близько 0,5 м/с), [2;6;7;9].

На практиці перемішування в основному виконується механічними мішалками, перекачуванням субстрату з верхньої зони метантенка до нижньої, а також біогазом, який пропускається через товщу субстрату. Найчастіше застосовуються мішалки пропелерні, лопатеві, рамкові, якірні та струменеві, кожна з яких має свої переваги та недоліки. Їх спільною особливістю є їх робочі органи захоплюють безпосереднім контактом малий об'єм субстрату, і тому вони повинні мати велику швидкість, щоби «розкрутити» решту маси. Наприклад, частота обертання пропелерної мішалки може досягати 300... 500 хв<sup>-1</sup>[10]. Але така швидкість руху субстрату різко пригнічує діяльність бактерій. Крім того, виникають труднощі з приводом таких мішалок: електродвигун і комутаційна апаратура перебувають в агресивному та вибухонебезпечному середовищі, а їх влаштування зовні метантенка ускладнює його герметизацію. Тому нами було запропоновано виконати мішалку за принципом колеса Сегнера і приводити її в обертальний рух від дії струменю субстрату, який подаватиметься через порожнистий вал мішалки до консолей з форсунками фекальним насосом [8]. Але, як показали розрахунки, швидкість струменю все ж таки залишатиметься високою, і тому розташування форсунок доцільне лише у нижній зоні метантенка (водночас збурюється намул) та у верхній зоні (для розбивання спіненої кірки шламу). А для зрушення субстрату у середній зоні метантенка потрібні додаткові елементи.

Аналізуючи інформацію щодо будови механічних мішалок [11], ми прийшли до висновку, що для метантенків невеликої місткості, враховуючи вимогу низької коллоїдної швидкості, доцільно застосувати мішалку із збільшеними по висоті лопатями («пелюсткову»). Нами було виконані відповідні розрахунки і теоретично обґрунтовано деякі геометричні параметри мішалки [12]. Наступним етапом є експериментальна перевірка запропонованої конструкції.

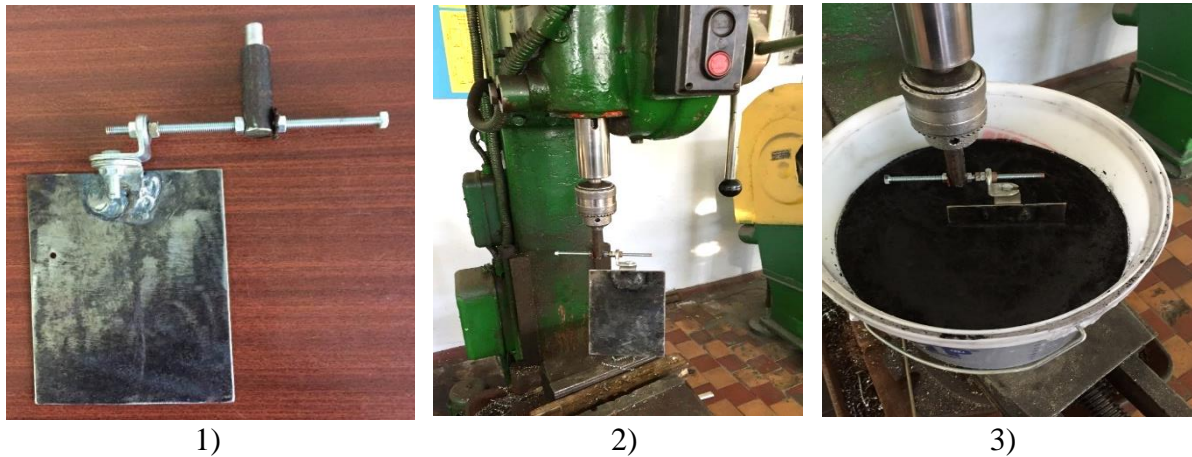
## 5. Методи досліджень

Експериментальне дослідження запропонованої конструкції мішалки на початковому етапі повинно дати відповіді на такі основні запитання:

- 1) наскільки якісно здійснюється перемішування при різних положеннях лопаті;
- 2) як при цьому змінюється споживана потужність.

Вважаємо, що в'язкість субстрату є незмінною і близька до середнього значення, наведеного у наукових працях і довідниках. Те саме стосується і густини субстрату (близько 1060 кг/м<sup>3</sup>). Що ж до частоти обертання мішалки, то є сенс варіації цього фактору у межах гранично припустимої лінійної швидкості 0,5 м/с. Очевидно, зниження частоти обертання буде супроводжуватись зменшенням споживаної потужності, але й водночас, можливе погіршення якості змішування. Очевидно, що на енергоємність процесу та якість змішування впливатимуть кути встановлення лопаті.

Зважаючи на обмежені матеріально-технічні можливості і категоричну заборону проводити досліди з гноєм в умовах навчального закладу, нами проведені експерименти з моделлю мішалки (рис. 1) на модельній рідині. Модель мішалки виготовлена у масштабі 1:10 і конструкційно відрізняється від натурального зразка способом кріплення лопаті, яку можна фіксувати під різними кутами у вертикальній та горизонтальній площині (рис. 1.1).



1) 2) 3)  
**Рис.1.** Модель лопаті мішалки для лабораторних досліджень:

1) модель лопаті М1:10 до натурального зразка; 2) встановлення моделі мішалки у свердильному станку; 3) контакт з модельною рідиною.

Безпосередньо процес перемішування здійснювали у пластиковому посуді лабораторною моделлю мішалки, закріпленою у патрон вертикально-свердильного станка 2А150, привод якого має широкий діапазон частоти обертання (рис. 1.2)

У якості модельної рідини застосовувався водний розчин гліцерину з додаванням вугільної крихти, в'язкість якого наближена до довідкової в'язкості гною. Вугільну крихту (перемелене на шаровому млині вугілля як паливо для печей місцевого цементного заводу) додаємо для кращої візуалізації процесу і для того, щоби збільшити концентрацію сухої речовини у модельній рідині (рис.1.3).

Оскільки розміри моделі значно відрізняються від натурального зразка, слід застосувати теорію подібності. На основі цієї теорії розмірні фізичні величини об'єднуються в безрозмірні комплекси, що дозволяє адекватно пов'язувати результати модельних випробувань з роботою реального технічного об'єкту.

Найчастіше у дослідженнях гідродинамічних процесів застосовують критерій Рейнольдса [13,14,15]. Він характеризує відношення сил інерції і сил в'язкості.

$$R_e = \frac{V * d}{\nu}, \quad (1)$$

Де  $V$  – швидкість рідини, м/с;

$d$  – діаметр труби, м;

$\nu$  – кінематична в'язкість рідини, м<sup>2</sup>/с

При заданих діаметрі трубопроводу  $d$  і в'язкості рідини  $\nu$  критерій Рейнольдса залежить лише від швидкості течії про і тому є, по суті, безрозмірною швидкістю. Однак цей критерій доцільно застосовувати у разі ярко вираженого турбулентного руху або ж тоді, коли розміри моделі наближені до розміру натурального зразка. При малій швидкості руху рідини (що і має місце при роботі досліджуваної мішалки) поруч із силами внутрішнього тертя та інерції зростає вплив масових сил. У цьому разі рекомендується застосування подібності Фруда, який по суті є мірою співвідношення енергії масових сил до сил інерції потоку [14,15].

$$F_r = \frac{V^2}{gl}, \quad (2)$$

Де  $g$  - прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;

$l$  - визначальний розмір, м.

Як визначальний розмір приймаємо радіус лопаті.

Тобто для натурального зразка  $l_1 = 1,5$  м; для моделі  $l_2 = 0,15$  м. Швидкість натурної лопаті задана технологічними вимогами і, як зазначалось вище, повинна бути на рівні  $V_1=0,5$  м/с. Так як за вимогами подібності величина критерію Фруда повинна бути однаковою для моделі і натурального зразка, то звідси можна знайти потрібну лінійну швидкість моделі:

$$F_r = \frac{V_1^2}{gl_1} = \frac{V_2^2}{gl_2} \Rightarrow V_2 = \sqrt{V_1^2 \cdot \frac{l_2}{l_1}}. \quad (3)$$

Підставляючи відповідні значення, одержимо:

$$V_2 = \sqrt{0,5^2 \cdot \frac{0,15}{1,5}} = 0,158 \text{ м/с}$$

Тоді кутова швидкість обертання моделі

$$\omega_2 = \frac{V_2}{l_2} = \frac{0,158}{0,15} = 1,05 \text{ рад/с}; \quad (4)$$

Потрібна частота обертання

$$n = \frac{30 \cdot \omega_2}{\pi} = \frac{30 \cdot 1,05}{3,14} = 10,03 = 10 \text{ хв-1}. \quad (5)$$

Отриману у ході експериментів величину потужності для моделі переводимо на натурний зразок за співвідношенням із критерія Фруда

$$N_1 = \sqrt{N_2 \cdot \frac{l_2}{l_1}}, \quad (6)$$

Для оцінки якості перемішування у наукових дослідженнях використовуються багато різних показників. Одним з найбільш поширених показників є коефіцієнт варіації [14,16], який визначають за формулою:

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2} \quad (7)$$

$\bar{c}$  - середнє арифметичне значення концентрації ключового компонента в пробах;

$c_i$  - значення концентрації ключового компонента в  $i$ -тій пробі.

За величиною коефіцієнта варіації якість суміші поділяють на такі групи

$V_c < 5\%$  - відмінна;

$V_c = 5 \dots 10\%$  - добра;

$V_c = 11 \dots 20\%$  - задовільна.

За ключовий компонент нами прийнята концентрація сухої речовини. Тому у ході дослідів потрібно визначати вологість маси. Цей параметр визначали за стандартною методикою, викладеною в ГОСТ 28268-89, застосовуючи устаткування: сушильну шафу СЕШ-3М, електронні ваги WM-120 з похибка вимірювань 0,01 г, металеві бюкси.

Для визначення густини речовини застосовували мірний посуд мензурку) ГОСТ 1770-74 об'ємом 100 см<sup>3</sup> та електронні ваги WM-120. Кінематичну в'язкість модельної рідини визначали за допомогою ротаційного віскозиметра фірми Fungilab (похибка вимірювань до 1% від усієї шкали) в наступній послідовності: ємність заповнювали модельною рідиною з різними співвідношенням компонентів; занурювали вимірювальний диск в ємність з рідиною; фіксували значення кінематичної в'язкості.

Потужність, споживану станком, визначали за допомогою амперметра лабораторного Д5080 класу точності 0,2 за класичною формулою

$$N_i = \sqrt{3}U * I * \cos \varphi, \quad (8)$$

Вважаючи лінійну напругу 380 В стабільною, а  $\cos\varphi=0.85$  маємо

$$N_i = 1,47 * I. \quad (9)$$

Порядок проведення дослідів.

- 1) на монтажному столі встановити задані кути нахилу лопаті лабораторної мішалки; після цього закріпити її у патроні свердлильного станка;
- 2) включити станок і заміряти силу струму при холостому ході, визначити відповідну споживану потужність  $N_{xx}$ . Цей крок можна зробити один раз і потім користуватись одержаним значенням в інших дослідах;
- 3) підготувати модельну рідину, змішавши гліцерин з водою у заданій пропорції при температурі розчину  $20^{\circ}\text{C}$ ;
- 4) при температурі маси  $55^{\circ}\text{C}$  визначити її кінематичну в'язкість за допомогою віскозиметра; при потребі змінити концентрацію гліцерину для досягнення необхідної в'язкості;
- 5) визначити густину рідини;
- 6) знову підігріти готову рідину до температури  $55^{\circ}\text{C}$ , причому рекомендується це робити безпосередньо у ємності для змішування;
- 7) встановити задану частоту обертання мішалки на коробці передач станка; опустити мішалку у ємність і включити її на 20 с;
- 8) одночасно зафіксувати покази амперметра;
- 9) завершивши перемішування, вимкнути станок, підняти мішалку і пробовідбірником взяти проби рідини у трьох точках з верхнього і нижнього шару. Проби брати через 1 хв. після вимкнення станка;
- 10) вміст кожної проби перелляти у бюкси і помістити їх в сушильну шафу СЕШ-3М для визначення відносної вологості;
- 11) розрахувати концентрацію сухої речовини в пробах;
- 12) розрахувати коефіцієнт варіації концентрації  $V_c$  в перерахунку на суху речовину;
- 13) розрахувати споживану потужність на перемішування за формулою:

$$N_{zm} = N_i - N_{xx} \quad (10)$$

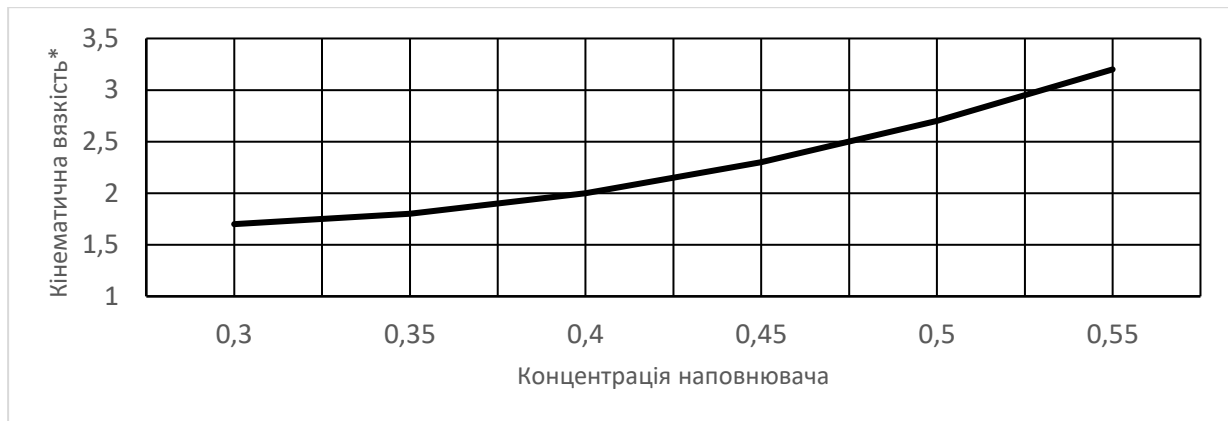
## 6. Результати досліджень

При підготовці модельної рідини для проведення дослідів визначалась її густина при різній концентрації органо-мінерального наповнювача.

**Таблиця 1.** Густина модельної рідини в залежності від співвідношення компонентів

Частка наповнювача, %	Густина проби, $\text{кг}/\text{м}^3$				Середньо-квадратичне відхилення, $\sigma$ , $\text{кг}/\text{м}^3$
	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_{\text{серед}}$	
0,5	1098	1104	1100	1101	3,06
0,44	1089	1093	1090	1091	2,08
0,4	1080	1082	1083	1082	1,53
0,36	1068	1071	1074	1071	3,00
0,33	1052	1047	1051	1050	2,65

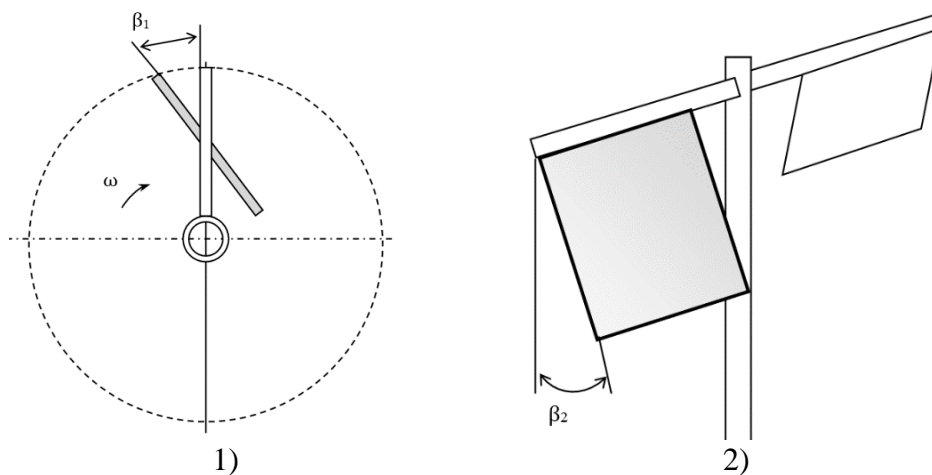
За допомогою віскозиметра визначена відповідна кінематична в'язкість розчину



**Рис.2.** Кінематична в'язкість модельної рідини,  $\times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Наведені параметри модельної рідини близькі до реологічних параметрів свинячого гною (густина  $1060 \text{ кг}/\text{м}^3$ , кінематична в'язкість  $1,5 \dots 2,5 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .)

Далі на модельній рідині визначались за наведеною вище методикою коефіцієнти варіації суміші по сухій речовині і споживна потужність мішалки при різних кутах встановлення лопаті.



**Рис.3.** Схеми для пояснення кутів встановлення лопаті:

1 - кут відхилення лопаті від напрямку обертання; 2 - кут відхилення лопаті від вертикалі.

Спочатку фіксувався кут  $\beta_2 = 0$  (лопатець вертикальний) і проводились дослідження при різних кутах  $\beta_1$  відхилення лопаті від напрямку обертання. Заміри брали у двох діаметрально протилежних точках і по центру резервуару у верхньому та нижньому горизонтах. Отримані результати представимо таблицею 2 і побудованому на її підставі графіку рис. 4.

Як видно із даних таблиці 2, майже у всіх випадках концентрація сухої речовини більше у пробах з верхнього шару суміші. Тобто мішалка точно буде запобігати сегрегації (розшаруванню) суміші. Однак коефіцієнт варіації рис. 4. демонструє, що найкраща якість змішування (не більше 10) буде у тому випадку, коли кут відхилення лопаті знаходиться у діапазоні  $\beta_1 = -15^\circ \dots +30^\circ$ . При куті понад  $45^\circ$  якість стає незадовільною, оскільки  $V_c > 20$ .

**Таблиця 2.** Концентрація сухої речовини у пробах при різних кутах відхилення лопаті, %

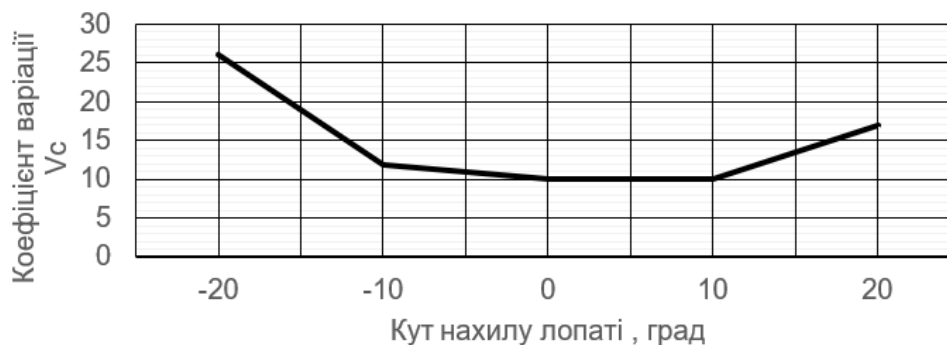
Точки заміру	Кут відхилення лопаті $\beta_1$ , град				
	-60	-30	0	30	60
верх А	8	9	9	11	14
верх Б	10	11	10	10	11
верх В	8	10	11	12	12
низ А	12	8	9	11	6
низ Б	7	10	10	10	8
низ В	10	11	10	10	8
середнє у верхньому горизонті	8,7	10,0	10,0	11,0	12,3
середнє у нижньому горизонті	9,7	9,7	9,7	10,3	7,3
Середнє по виборці	9,2	9,8	9,8	10,7	9,8

**Рис.4.** Коефіцієнт варіації  $V_c$  при різних кутах встановлення лопаті  $\beta_1$ .

Подібним чином проводились досліди і при різних кутах нахилу лопаті  $\beta_2$  при зафіксованому  $\beta_1=0$ .

**Таблиця 3.** Концентрація сухої речовини у пробах при різних кутах нахилу лопаті, %

Точки заміру	Кут нахилу лопаті $\beta_2$ , град				
	-20	-10	0	10	20
верх А	13	11	9	10	10
верх Б	14	10	10	11	11
верх В	11	10	11	12	8
низ А	8	8	12	11	10
низ Б	7	9	11	10	9
низ В	10	11	10	9	13
середнє у верхньому горизонті	12,7	10,3	10,0	11,0	9,7
середнє у нижньому горизонті	8,3	9,3	11,0	10,0	10,7
Середнє по виборці	10,5	9,8	10,5	10,5	10,2

**Рис. 5** Коефіцієнт варіації  $V_c$  при різних кутах встановлення лопаті  $\beta_2$ .



Як свідчать одержані результати, зміна кута  $\beta_2$  сильніше впливає на якісні показники процесу. Припустима якість змішування забезпечується у діапазоні  $\beta_2 = -15 \dots +20^\circ$ , але найкращим цей показник є при  $\beta_2 = 0 \dots 10^\circ$ . Зауважимо, що при нахилі лопаті на кут понад  $-20^\circ$  (тобто верхньою кромкою у напрямку руху) якість змішування стає незадовільною.

**Таблиця 4.** Потужність на змішування при різних кутах відхилення  $\beta_1$ , град

Потужність, Вт	кут відхилення $\beta_1$ , град				
	-60	-30	0	30	60
Модель	205	224	240	265	290
Натурний зразок	648	708	759	838	917

З даних таблиці чітко видно, що при розвороті лопаті проти ходу обертання потужність зменшується, очевидно, за рахунок зменшення площі міделя. Але водночас, як свідчить попередній графік, стрімко погіршується якість змішування.

**Таблиця 5.** Потужність на змішування при різних кутах нахилу  $\beta_2$ , град

Потужність, Вт	кут нахилу $\beta_2$ , град				
	-60	-30	0	30	60
Модель	280	257	244	268	310
Натурний зразок	885	813	772	847	980

Як видно з наведених даних, точка мінімуму відповідає вертикальному положенні лопаті. У всіх інших варіантах потужність поступово зростає, очевидно через утворення зон підвищеного тиску.

В цілому визначені нами теоретичним шляхом кути встановлення лопаті  $\beta_1=29^\circ$  та  $\beta_2=12^\circ$  близькі до таких, при яких забезпечується належна якість змішування при мінімумі споживаної потужності.

## 7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Подальші дослідження у перспективі передбачаються для з'ясування таких питань:

- 1) уточнення показників процесу перемішування на різних режимах натурального зразка мішалки на різних видах субстрату;
- 2) вплив форми камери та ексцентриситету осі мішалки на рівномірність змішування та коливання маси субстрату;
- 3) вплив поверхні лопаті (гладка, з отворами, решітчаста) на показники процесу.

## 8. Висновки

Зважаючи на реальні матеріально-технічні можливості і у заборону проводити досліди із справжнім гноєм в умовах навчального закладу, пошукові експерименти можна проводити з моделлю мішалки та на модельній рідині. Оскільки розміри моделі значно відрізняються від натурального зразка, було застосовано критерій подібності Фруда, який по суті є мірою співвідношення енергії масових сил до сил інерції потоку. Як визначальний розмір прийнято радіус лопаті. Тоді для натурального зразка  $l_1 = 1,5$  м; для моделі  $l_2 = 0,15$  м. За критерієм Фруда, для збереження подібності швидкість руху лопаті повинна бути  $0,158$  м/с, кутова швидкість обертання моделі  $1,05$  рад/с; потрібна частота обертання  $10$  хв<sup>-1</sup>.

Для оцінки якості перемішування прийнято коефіцієнт варіації, а за ключовий компонент - концентрація сухої речовини. Тому у ході дослідів потрібно визначалась вологість 6 проб, взятих у трьох точках ємності на верхньому і на нижньому рівні. Результати аналізу отриманих даних показала, що майже у всіх варіантах встановлення лопаті концентрація сухої речовини

більше у пробах з верхнього шару суміші. Тобто мішалка точно буде запобігати сегрегації (розшаровуванню) суміші. Однак коефіцієнт варіації демонструє, що найкраща якість змішування (не більше 10) буде у тому випадку, коли кут відхилення лопаті знаходиться у діапазоні  $\beta_1 = -15^0 \dots +30^0$ . При куті понад  $45^0$  якість стає незадовільною, оскільки коефіцієнт варіації  $V_c > 20$ .

Як свідчать одержані результати, зміна кута  $\beta_2$  сильніше впливає на якісні показники процесу. Припустима якість змішування забезпечується у діапазоні  $\beta_2 = -15 \dots +20^0$ , але найкращим цей показник є при  $\beta_2 = 0 \dots 10^0$ . При нахилі лопаті на кут понад  $-20^0$  (тобто верхньою кромкою у напрямку руху) якість змішування стає незадовільною. З даних чітко видно, що при розвороті лопаті проти ходу обертання потужність зменшується, очевидно, за рахунок зменшення площі міделя. Але водночас стрімко погіршується якість змішування. Точка мінімуму відповідає вертикальному положенні лопаті. У всіх інших варіантах потужність поступово зростає, очевидно через утворення зон підвищеного тиску.

В цілому визначені нами теоретичним шляхом кути встановлення лопаті  $\beta_1 = 29^0$  та  $\beta_2 = 12^0$  близькі до таких, при яких забезпечується належна якість змішування при мінімумі споживаної потужності.

### Список літератури:

- 1) Вайланд, П., Геммеке, Б., Ригер, К. (2015). Биогаз на основе возобновляемого сырья. Сравнительный анализ шестидесяти одной установки по производству биогаза в Германии (сбор данных по Северо-Западному региону). Аналитическая записка №1. Available at: [https://sojus.dbfz.de/sites/default/files/pdf\\_426online\\_russ\\_brosch\\_bmpii\\_kurz\\_2010.pdf](https://sojus.dbfz.de/sites/default/files/pdf_426online_russ_brosch_bmpii_kurz_2010.pdf).
- 2) Томас А. (2012). Руководство по биогазу: от получения до использования. Rostock: Специальное агентство возобновляемых ресурсов (FNR). 213. Available at: <https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/h/a/handreichungbiogasru2012.pdf>
- 3) Голуб, Г., Гайденко, О. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок. Агробізнес сьогодні: веб-сайт. Available at: <http://agro-business.com.ua/agro/ideitrendy/item/8386-suchasni-tendentsii-rozvytku-biohazovykh-ustanovok.html>.
- 4) Ратушняк, Г., Джеджула, В. (2006). Энергозбереження в системах біоконверсії: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 83.
- 5) Кооп Ю. (2012). Виробництво і використання біогазу в Україні: посібник. Рада з питань біогазу Ltd Biogasrat e.V. в партнерстві з Адвокатським об'єднанням «Arzinger». 74 с.
- 6) Майстренко, О. Куріс, Ю. (2010) Методи та технології анаеробної переробки тваринницької біомаси. Энергосбережение. энергетика. энергоаудит. №2 (72). 29-36.
- 7) Сенчук, М. (2009). Підвищення ефективності роботи біогазової установки. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: зб. наукових праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого . Вип. 13 (27). 395-404.
- 8) Краснолуцький, П. (2019). Основні завдання при проектуванні гідромеханічної системи перемішування субстрату у метантенку. Аграрна наука та освіта в умовах євроінтеграції: збірник наукових праць міжнар. наук.-практ. конф. Ч.2. (20-21 березня 2019 р., м. Кам'янець-Подільський). Тернопіль : Крок. 75-78.
- 9) Кудря С., Головка, В. (2015). Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії. Київ: НТУУ КПІ. 201 с.
- 10) Семененко, И. (2013). Проектирование биогазовых установок. Сумы: ПФ «МакДен», ИПП «Мрия-1» ЛТД., 347 с.
- 11) Девін, В., Ткачук, В. (2016). Моделирование процесу роботи лопатевого змішувача в програмному комплексі FLOW VISION. Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Кам'янець-Подільський. Вип. 24. Ч. 2. 65-72.

12) Краснолуцький, П. (2021). До обґрунтування параметрів лопатевої мішалки метантенка. Multidisciplinary academic research and innovation: Abstracts of XXVII International Scientific and Practical Conference Amsterdam, Netherlands May 25 – 28, 2021. 734-742. DOI - 10.46299/ISG.2021.I.XXVII

13) Кислий, В. (2011). Організація наукових досліджень: навчальний посібник. Суми: Університетська книга. 224.

14) Білей, П. та ін. (2012). Методологія наукових досліджень технологічних процесів. Львів: Видав. НУ «Львівська політехніка». 352.

15) Дуганець, В. та ін. (2013). Гідравліка: Навчально-методичний комплекс. Кам'янець-Подільський. ФОП Сисин О.В., 572.

16) Засименко, В. (2006). Основи теорії планування експерименту. Навч. посібник. Львів: Видав. ДУ «ЛП», 205.

---

## Justification of the design and technological parameters of the methane tank stirrer

**Krasnolutskyi Petro P.**

Department of tractors, vehicles and energy equipment, Podilskyi State University, Kamyanets-Podilskyi, Ukraine

ORCID 0000-0003-2469-3190

---

**Abstract:** The article presents the results of the initial experimental studies of the methane tank stirrer for the biogas plant system with the hydraulic system of transportation and mixing of the substrate. At the previous stages of scientific researches, the composition and parameters of the hydraulic system, as well as the hydromechanical stirrer based on the Segner wheel type, were theoretically determined. Taking into account the real material and technical possibilities and the ban on conducting experiments with real manure in the conditions of an educational institution, research experiments were conducted with a model of a stirrer on a model liquid. Since the dimensions of the model are significantly different from the real sample, the Froude similarity criterion was applied, which is essentially a measure of the ratio of the energy of the mass forces to the inertial forces of the flow. The radius of the blade is taken as the determining size. Then, for a real sample,  $r_1 = 1.5$  m; for the model  $r_2 = 0.15$  m. According to Froude's criterion, to maintain similarity, the speed of the blade should be 0.158 m/s, the angular speed of rotation of the model 1.05 rad/s; a rotation frequency of 10 min<sup>-1</sup> is required.

To evaluate the quality of mixing, the coefficient of variation is taken, and the concentration of dry matter is the key component. Therefore, during the experiments, it was necessary to determine the moisture content in 6 samples taken at three points of the container at the upper and lower level. The obtained data analysis showed that in almost all options for installing the blade, the concentration of dry matter is higher in samples from the upper layer of the mixture. That is, the stirrer will definitely prevent segregation (stratification) of the mixture. However, the coefficient of variation shows that the best quality of mixing (no more than 10) will be in the case when the blade deviation angle is in the range  $\beta_1 = -150 \dots +300$ . At an angle of more than 450, the quality becomes unsatisfactory because the coefficient of variation is  $V_c > 20$ .

As the obtained results show, the change in the  $\beta_2$  angle has a stronger effect on the process's quality. The acceptable mixing quality is ensured in the range  $\beta_2 = -15 \dots +200$ , but the best indicator is at  $\beta_2 = 0 \dots 100$ . When the blade is tilted at an angle of more than -200 (that is, with the upper edge in the direction of movement), the mixing quality becomes unsatisfactory.

From the experiments, it was established that when the blade is turned against the direction of rotation, the power decreases, obviously, due to a decrease of the midsection area. But at the same time, the mixing quality deteriorates rapidly. The minimum point corresponds to the vertical position

of the blade. In all other options, the power gradually increases, obviously due to the formation of zones of increased pressure.

In general, the blade installation angles  $\beta_1=29^\circ$  and  $\beta_2=12^\circ$ , determined by us theoretically, are close to those that ensure the proper quality of mixing with minimum power consumption.

**Key words:** biogas, substrate, methane tank, mixing, stirrer, blade, angle of inclination, model.

---