

## СУЧАСНІ СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВІ ФЕРМЕНТЕРИ У СКЛАДІ ПІДПРИЄМСТВ ІЗ ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ

**Пічугін С. Ф.**, доктор техн. наук, професор,  
**Оксененко К. О.**, аспірантка

*Національний університет «Полтавська політехніка  
імені Юрія Кондратюка», Україна*

**Анотація.** Наведена інформація щодо втрат агропромислового комплексу України за умов воєнного стану. Розглянуті властивості біоетанолу та історія його використання як рідкого екологічного біопалива. Проаналізовано переваги біоетанолу в якості автомобільного палива. Виділені сільськогосподарські культури з великим змістом крохмалю чи цукру, які найбільш затребувані для виробництва біоетанолу. Наведено дані щодо річного технічно-досяжного енергетичного потенціалу біоетанолу в Україні. Розглянуто концепції розвитку виробництва біоетанолу в Україні. Наведено схему виробництва біоетанолу з кукурудзи і призначення ферментерів у цій схемі. Надано класифікацію ферментерів, у залежності від способу ферментації субстрату, виділені переваги твердофазного бродіння. Описані типи ферментерів, їх переваги, недоліки та сфери застосування, в залежності від внутрішнього оснащення. Проаналізовано переваги та недоліки металевих та залізобетонних резервуарів, застосованих в якості конструкцій ферментерів. Описаний перший горизонтальний ферментер спірально-фальцевого типу. Наведено конструкцію та характеристики сучасного спірально-фальцевого ферментера – важливої складової біоетанольних комплексів.

## MODERN SPIRAL-FOLD FERMENTERS AS PART OF BIOETHANOL PRODUCTION COMPLEXES

**Pichugin S.F.**, DSc, Professor, **Oksenenko K.O.** graduatestudent

*National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Ukraine*

**Abstract.** The information about the losses of the agricultural sector of Ukraine under a state of war are given. The properties of bioethanol and the history of its use as a liquid biofuel are considered. The advantages of bioethanol as a car fuel are analyzed. The most popular crops with high levels of starch or sugar for bioethanol production are highlighted. The data about the annual technically achievable energy potential of bioethanol in Ukraine are presented. Concepts of the development of bioethanol production in Ukraine are considered. The scheme of bioethanol

production from corn the purpose of fermenters in this scheme are given. The types of fermenters, their advantages, disadvantages, and areas of application, depending on the internal equipment, are described. The advantages and disadvantages of metal and reinforced concrete tanks used as fermenter structures are analyzed. The first horizontal spiral-fold type fermenter is described. The design and characteristics of a modern spiral-fold fermenter, as an important component of bioethanol complexes, are presented.

У реаліях сьогодення, агропромисловий комплекс України зазнає значних втрат за умов воєнного стану. За даними на травень 2022 року Україна вже втратила майже 13 млн. тонн елеваторних потужностей, частина зерноскладів повністю зруйнована, частина опинилася на окупованих територіях. Це призвело до значного дефіциту емкостей зберігання сільськогосподарських культур. Одним із рішень цієї проблеми є запозичення досвіду США, а саме перехід до малих елеваторів та використання мобільних споруд, що дозволить фермерам зберігати агропродукцію у власних господарствах та упорядкувати її реалізацію [1]. Однак залишається питання зі зберіганням зернових залишків та неякісного зерна, яке надходить із полів. У цій ситуації, поруч із потужностями зберігання збіжжя, перспективною стає переробка сільськогосподарських культур та їх відходів. Закордонний досвід показує, що неякісне зерно краще переробити на біоетанол. Враховуючи паливну кризу, така переробка стає все більш актуальною[2].

Біоетанол – це звичайний етиловий (винний) спирт, отримуваний під час перероблення рослинної сировини, головним чином заради використання його як палива. Історія рідкого біопалива почалася ще в ХІХ столітті. Етанол, синтезований із біомаси, вважається паливом для автомобілів із тих пір, як була започаткована автомобільна промисловість. Одним з перших винахідників був Семюель Морі, який у 1826 році розробив модель двигуна, що міг працювати на спирті і скипидарі. В 1876 році німецький винахідник Ніколас Отто створив перший у світі чотирьохтактний двигун внутрішнього згоряння, який працював на біоетанолі. Переваги біоетанолу оцінили ще в 1908 році, коли Генрі Форд випустив свою знамениту «Модель Т», двигун якої працював на етанолі. Форд вважав використання спирту вигідним не тільки з технічної, але і з економічної точки зору.

Переваги біоетанолу як автомобільного палива:

- зменшення утворення нагару і зниження кількості шкідливих речовин;
- біоетанол є поновлюваним ресурсом і практично нейтральним як джерело парникових газів. Під час отримання й наступного згоряння біоетанолу виділяється стільки ж CO<sub>2</sub>, скільки було вилучено з атмосфери використаними для його виробництва рослинами;
- зниження токсичність вихлопу на 21%;
- присутній в етанолі кисень дозволяє повніше спалювати вуглеводні палива;
- 10% етанолу в бензині дозволяють скоротити викиди твердих частинок на 50%, CO<sub>2</sub> – на 30%. За наявного виробництва спиртового палива це еквівалентно зникненню з доріг 1 млн. автомобілів щорічно;
- біоетанол є біологічно розкладаваним, він не забруднює природні водні системи.

Сьогодні більшу частку біоетанолу виробляють із кукурудзи (США) і цукрової тростини (Бразилія), хоча сировиною для його одержання можуть бути будь-які сільськогосподарські культури з великим змістом крохмалю чи цукру: рис, сорго, ячмінь, картопля, цукрові буряки, батат. Великий потенціал має маніока, яку у великій кількості виробляють Китай, Нігерія, Таїланд.

Найбільш затребуваними для виробництва біоетанолу зерновими культурами є: кукурудза (410 л/т), пшениця (375 л/т), ячмінь (330 л/т), жито (357 л/т), в дужках вказано кількість отримання біоетанолу в літрах з тонни продукції [3].

Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал біоетанолу в Україні є еквівалентним 606 тис. т. н. е. Найбільший його потенціал зосереджений у Вінницькій, Сумській, Чернігівській, Полтавській областях, де він становить понад 250 тис. т. н. е./рік [4].

Концепція виробництва біоетанолу в Україні може включати кілька напрямків: реконструкцію існуючих спиртових заводів; дооснащення існуючих цукрових заводів технологічними лініями; спорудження нових технологічних ліній великої та малої потужності.

Сучасна промислова технологія отримання етилового спирту з харчової сировини складається з таких стадій (рис. 1):

- підготовки й подрібнення сировини;
- ферментування;
- ректифікування браги.

Ферментування сировини є одним із найважливіших процесів виробництва біоетанолу. Тому до конструкцій, в яких відбуваються ці процеси, висуваються жорсткі вимоги щодо надійності та міцності.

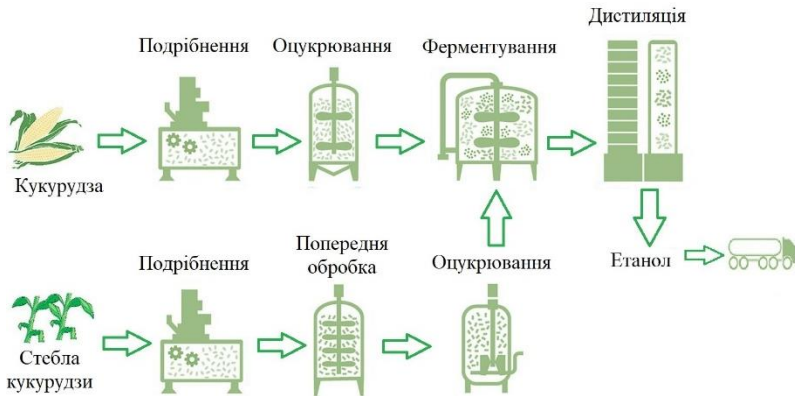


Рисунок 1 – Схема виробництва біоетанолу з кукурудзи

Ферментер – це система, що складається з різних типів обладнання для забезпечення росту мікробів шляхом контролю умов навколишнього середовища. Типовий ферментер складається з трьох частин, таких як культуральна ємність, відповідна система живлення та середовища, а також система вимірювання та контролю.

Ферментери являють собою залізобетонні або металеві резервуари з теплоізоляційним покриттям. Залізобетонні резервуари зброджування були досить розповсюдженими, однак вони мають свої недоліки: складність у виготовленні, велика вага та вартість. В зв'язку з процесами, які відбуваються всередині конструкції, утворення тріщин, протікання та корозія бетону були не рідкістю, і в крайніх випадках резервуари, які постраждали від цих проблем, доводилося зносити. Для попередження таких випадків у Німеччині були розроблені інструкції для сільськогосподарського будівельного сектора під назвою «Бетон для резервуарів на біогазових установках» [5].

Ферментери можуть класифікуватися за багатьма ознаками. За формою резервуари можуть бути циліндричними з конусним днищем і конічним або сферичним перекриттям, а також можуть бути кулястої, яйцевидної форми. За розміром ферментери класифікують наступним чином: малі, лабораторні та дослідницькі ферментери об'ємом від 1 до

50 літрів; середні, ферментери заводів, від 50 до 1000 літрів; великорозмірні, ферментери промислових виробництв, понад 1000 літрів. Ферментери малих розмірів є автоклавами, тоді як великорозмірні ферментери очищуються шляхом стерилізації на місці. Невеликі лабораторні ферментери розроблені для забезпечення різноманітних умов для росту мікроорганізмів, які зустрічаються в найбільших резервуарах промислового виробництва. Часто, для кращої теплоізоляції, ферментери влаштовують заглибленими в землю або обволікають землею [6, 7].

Основною функцією ферментера є забезпечення контрольованого середовища для росту мікроорганізмів з метою отримання бажаного продукту. В залежності від способу ферментації субстрату ферментери класифікують на резервуари глибинної та поверхневої ферментації. Класифікація ферментерів показана на рис.2.



Рисунок 2 – Класифікація ферментерів

Поверхнева ферментація або твердофазне бродіння використовує твердий субстрат для вирощування мікроорганізмів, тоді як глибинне бродіння використовує рідке середовище. Таким чином, це ключова відмінність між твердофазним бродінням і глибинним бродінням [8].

У *глибинних ферментерах* (система призупиненого росту) мікроорганізми диспергуються в живильному середовищі (рідині) при підтримуваних умовах середовища. В залежності способу перемішування ферментери далі класифікуються наступним чином:

ферментери з механічним перемішуванням; з конвекцією; пневматичні ферментери.

*Ферментери з механічним перемішуванням* – оснащені механічною мішалкою для підтримки однорідності та швидкого диспергування та змішування матеріалів. Такий тип є найбільш застосовним ферментом у бродильній промисловості для періодичного процесу.

Основною перевагою цього ферментера є гнучкість конструкції, він використовується в широкому діапазоні розмірів. Мішалки складаються з одного або кількох робочих коліс, закріплених на валу. Використовуються різні типи лопатей відповідно до вимог, які обертаються за допомогою двигуна. Цей ферментер із резервуаром для перемішування показаний на рис. 3.

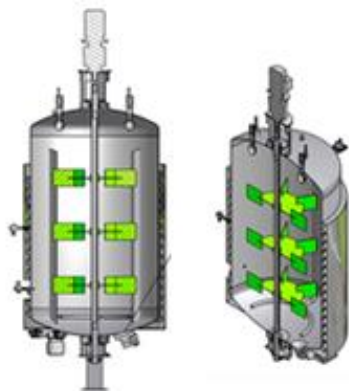


Рисунок 3 – Ферментер із резервуаром для перемішування  
(<http://uralmash.net/fermenter.html>)

Резервуари з перемішуванням зазвичай використовуються для періодичних процесів з невеликими модифікаціями, ці реактори прості за конструкцією та легкі в експлуатації. Тому у промисловості все ще віддають перевагу резервуарам із перемішуванням, оскільки в разі забруднення або утворення будь-якого іншого неякісного продукту втрати мінімальні. Резервуари з періодичним перемішуванням зазвичай страждають через їх низьку об'ємну продуктивність. Часи простоїв є

досить великими, а ферментація в нестационарному стані створює стрес для мікробних культур через обмеження поживних речовин. Переваги ферментерів із періодичним перемішування: менший ризик зараження або мутації клітин через короткий період росту; процес більш економічний і простий; рівень перетворення сировини вище. Недоліки: низька продуктивність через час, необхідний для стерилізації, наповнення, охолодження, спорожнення, очищення тощо; більших витрат потребують процеси контролю; більше уваги до інструментів через часту стерилізацію.

Ферментер із постійним перемішуванням має таку ж конструкцію що і періодичний. Однак, при безперервній ферментації свіже середовище безперервно додається в ферментаційну ємність. Переваги безперервної ферментації: менші витрати праці за рахунок автоматизації процесу бродіння; менший ризик токсичності для оператора будь-якими токсинами, що виробляються мікроорганізмами; високий вихід і якісний продукт завдяки незмінним робочим параметрам і автоматизації процесу; менше навантаження на ферментер, оскільки стерилізація не дуже часта. Недоліки безперервної ферментації: вищі інвестиційні витрати на обладнання для керування та автоматизації; більший ризик зараження та мутації клітин; у безперервному процесі можливі лише незначні зміни.

*Ферментери з примусовою конвекцією:* У ферментерах із примусовою конвекцією на перемішування впливає використання насоса замість механічної мішалки. Доступні різні типи ферментерів з примусовою конвекцією, такі як: газліфтний та ерліфтний ферментер, барботажна колонка або ферментер із барботажним резервуаром.

Ерліфтні ферментери класифікуються як трубчасті ферментери або ферментери з внутрішнім контуром і ферментери із зовнішнім контуром. У газліфтних ферментерах внутрішня циркуляція рідини в посудині досягається шляхом барботування посудини газом. Рідинний об'єм посудини поділяється на дві з'єднані між собою зони тяговою трубою. Повітря зазвичай подається через кільце розпилювача в нижню частину центральної тягової труби, яка контролює циркуляцію повітря та середовища. Ерліфтна система ферментера із зовнішнім контуром використовується для прямої циркуляції повітря та рідини по всій ємності. Ця система складається зі стояка та зовнішнього опускового трубопроводу, які з'єднані внизу та зверху відповідно. Повітря, що нагнітається внизу стояка, створює бульбашки газу, які піднімаються

через ферментаційний бак, а більш важкий розчин опускається вниз. Ерліфтна система із зовнішнім контуром має деякі переваги порівняно зі стандартними ерліфтами (резервуари з внутрішнім контуром), такі як: просте вимірювання та контроль у стояку; ефективний контроль температури та теплообмін; низький коефіцієнт тертя з оптимальним гідравлічним діаметром для стояка та нижньої труби ;конкретний час перебування в індивідуальній секції.

Ферментер із барботажним резервуаром являє собою циліндричну колону, в якій газ барботується знизу через сопла на перфорованій або пористій розподільній пластині. Бульбашки газу піднімаються крізь рідину в посудині та можуть бути повторно розсіяні низкою горизонтальних перфорованих перегородок. Контроль температури підтримується температурною оболонкою або внутрішніми котушками.

*Пневматичний ферментер* – резервуар із псевдозрідженим шаром, який використовується для ферментації рідини із суспендованим ферментом або клітинними частинками або мікробними пластівцями. Частинки клітини псевдозріджені висхідним потоком рідини. Верхню частину киплячого ферментера розширюють, щоб зменшити поверхневу швидкість киплячого шару. Тверді речовини легко схоплюються в зоні застигання, а потім потрапляють у зону кипіння.

*Поверхневі ферментери* за режимом змішування і режимом аерації можна поділити на три основні типи. До них належать тарілчасті ферментери, резервуари з упакованим шаром і ферментери з перемішуванням. Найпростішим є *тарілчастий ферментер*. У тарілчастого резервуара відносно тонкий шар субстрату розподіляється на великій горизонтальній площі. Примусова аерація відсутня, хоча дно лотка може бути перфорованим, а повітря циркулювати навколо лотка. Змішування, якщо воно є, здійснюється простими автоматичними пристроями або вручну. Внутрішня температура може змінюватися залежно від температури навколишнього середовища; або лоток можна поставити в кімнату з регульованою температурою. Тарілчасті ферментери успішно використовувалися в лабораторних, пілотних, напівкомерційних і комерційних масштабах [9]. Хоча конструкція реактора проста, в Японії повідомлялося про широку механізацію та автоматизацію технологічного процесу [10].



*Ферментер із ущільненим шаром* характеризуються наявністю статичної підкладки, що підтримується на перфорованій базовій плиті, через яку застосовується примусова аерація. Конструкція ферментерів із ущільненим шаром відрізняється за такими аспектами: поперечний переріз біореактора може мати різну форму; резервуар може бути вертикальним, горизонтальним або під кутом; аерація може здійснюватися як зверху, так і знизу. Можливі багато варіацій цієї базової конструкції [10]. Типовою конструкцією є висока тонка циліндрична колона. Найчастіше примусове повітря подається на дно. Вологість повітря, що надходить, підтримується високою, щоб мінімізувати втрату води з субстрату. Температуру повітря, що надходить, можна змінювати, щоб допомогти регулювати температуру субстрату. Додаткову аерацію можна забезпечити, вставивши всередину біореактора перфоровану трубку. Перевага ферментерів із ущільненим шаром полягає в тому, що вони залишаються простими, але дозволяють краще контролювати процес, ніж тарілчасті.

Існує два загальних типи *ферментерів із перемішуванням*. Перший являє собою обертовий барабанний реактор, що складається з горизонтального або похилого циліндра, який обертається навколо центральної осі та викликає перекидання підкладки. Аерація може забезпечуватися або знизу або зверху головного простору. Перемішування є обережним, хоча можуть виникнути проблеми, якщо мікроорганізми чутливі до перемішування. Другий тип ферментера з перемішуванням, реактор із перемішуванням, має реактор, розміщений або на горизонтальній, або на вертикальній осі. Горизонтальні реактори схожі на барабани, що обертаються, за винятком того, що змішування забезпечується внутрішнім скребком або лопатями, а не обертанням реактора. Реактори з вертикальним перемішуванням піддаються примусовій аерації та постійно або періодично перемішуються.

Розглянувши типи поверхневих ферментерів, можна навести такі переваги твердофазного бродіння:

- ферментація в твердому стані дає вищі продуктивність ферментації, ніж бродіння в рідині;
- усі природні середовища існування для ферментів легко підтримуються в твердому стані ферментації;
- поживні середовища дуже прості і вони забезпечують усі поживні речовини для росту мікроорганізмів;
- проста конструкція ферментера та низькі потреби в енергії;

- через концентровану природу субстрату використовуються невеликі реактори.

Твердофазне бродіння використовується для промислового виробництва різноманітних продуктів, таких як: біогаз, пігменти та антибіотики; воно також може застосовуватися в багатьох різних галузях, наприклад, у виробництві продуктів харчування та ароматизаторів, виробництві ліків, переробці відходів або екологічних технологіях. Одним із прикладів традиційного твердофазного бродіння є виробництво саке (японського алкогольного напою з рису). Відшліфований і відварений рис служить твердим субстратом для першого етапу бродіння в процесі виробництва саке. Після твердофазного бродіння, наступним етапом є рідке бродіння, під час якого дріжджі перетворюють цукор на етанол.

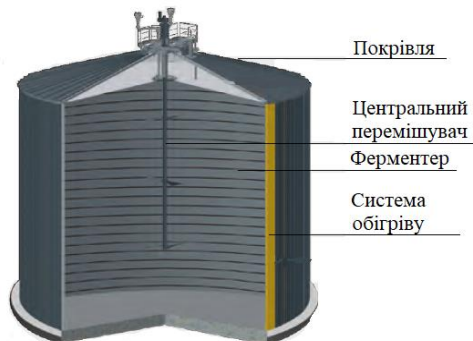
У промислового виробництві перевагу мають металеві ферментери, в яких відбуваються процеси твердофазного бродіння. Конструкція та режим роботи ферментера в основному залежать від виробничого процесу, оптимальних умов роботи, необхідних для утворення цільового продукту, вартості продукту та масштабу виробництва. Основні вимоги до конструкції ферментера: міцність та надійність, щоб витримувати різні види обробки, такі як вплив високої температури, тиску та сильних хімікатів, миття та чищення; придатність для стерилізації та підтримки суворих асептичних умов упродовж тривалих періодів фактичного процесу бродіння. Перспективним рішенням легкої та герметичної ємності ферментера є металеві резервуари спірально-фальцевого типу. Спірально-фальцевий резервуар має циліндричний корпус, який являє собою систему спірального з'єднання сталевий стрічки шляхом подвійного вальцювання. Монтаж конструкції відбувається за допомогою автоматизованої формувальної установки, за технологією німецької компанії Lipp GmbH [11]. Ці конструкції також починають набувати популярності на територіях України [12]. Наприкінці 1970-х років був створений перший горизонтальний ферментер спірально-фальцевого типу з лопатевою мішалкою та гвинтовим конвеєром (рис. 4). З того часу компанія невпинно удосконалює свої конструкції в сфері біоенергетики.



Рисунок 4 – Спірально-фальцевий горизонтальний ферментер  
([https://xaver-lipp.com/.](https://xaver-lipp.com/))

Однією з останніх розробок є ферментер з зовнішнім нагрівом та центральним перемішувачем (рис. 5). Об'єм конструкції варіюється від 100 м<sup>3</sup> до 7000 м<sup>3</sup>, робочий тиск 0-700 Ра. Основна частина резервуару виконана з нержавіючої сталі (Verginox) та оснащена центральною мішалкою. Гладкі внутрішні стінки також зменшують утворення відкладень у конструкції. Особливістю цього резервуару є мембранний дах із нержавіючої сталі, який не має болтів. Конструкція даху щільно прилягає до краю резервуару за допомогою спеціального профілю, не вимагаючи болтових з'єднань. При необхідності, ззовні ферментера можна встановити обігрів та ізоляцію, що підвищує енергоефективність.

а)



б)



Рисунок 5 – Ферментер спірально-фальцевого типу: а) 3-Д схема ферментара; б) загальний вигляд у складі біоенергетичної установки ([https://xaver-lipp.com/.](https://xaver-lipp.com/))

**Висновки.** В реаліях сьогодення, агропромисловий комплекс України зазнає змін. Враховуючи втрати елеваторних потужностей, стає доцільним переробляти сільськогосподарську продукцію, а не зберігати її. В статті розглянуті властивості біоетанолу та історія його використання як рідкого екологічного біопалива. Наведено дані щодо річного технічно-досяжного енергетичного потенціалу біоетанолу в Україні. Розглянуто концепції розвитку виробництва біоетанолу в Україні.

Ферментування сировини є одним із найважливіших процесів виробництва біоетанолу. Тому до конструкцій, в яких відбуваються ці процеси, висуваються жорсткі вимоги щодо надійності та міцності. Наведено класифікацію ферментерів, у залежності від способу ферментації субстрату. Проаналізовано основні вимоги до конструкцій ферментерів. Зважаючи на це, обґрунтовано, що перспективним рішенням легкої та герметичної ємності ферментера є металевий резервуар спірально-фальцевого типу.

#### **Використані інформаційні джерела:**

1.Пічугін С. Ф., Оксененко К. О. Модульний склад шатрового типу для тимчасового зберігання зерна. Тези 74-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Том 1.: 36. матеріалів, м. Полтава, 25 квіт. – 21 трав. 2022 р. С. 106–107.

2. Agravery [Интернет ресурс]. –Режим доступу – <https://agravery.com>.
3. Колосов О. Є., Рябцев Г. Л., Сівецький В. І., Сідоров Д. Е., Пристайлов С. О. Високоєфективні засоби приготування біопалива. К. : Січка, 2010. 152 с.
4. Біоенергетика: Курс лекцій. Частина 1 [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: М. О. Будько. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 109 с.
5. Guide to biogas – from production to use – Gölzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2010. 232 с. (5th).
6. Пічугін С., Оксененко К. Сталеві спіральні-фальцеві конструкції у складі біоенергетичних комплексів. Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022 : колективна монографія. Полтава – Львів : НУПП імені Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка». Дніпро. С. 470–484 (2022).
7. Пічугін С., Оксененко К. Метантенк – металевий спіральний-фальцевий резервуар – у складі біоенергетичних об'єктів. Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022: зб. матеріалів І міжнародної науково-практичної конференції: м. Полтава – Львів, 26–27 трав. 2022 р. Полтава, 2022. С. 483–485.
8. Filer, Keith, et al. «Production of Enzymes for the Feed Industry Using Solid Substrate Fermentation». Engormix, Engormix, 20 Apr. 2007.
9. Ahmed, S.Y., B.K. Lonsane, N.P. Ghildyal and S.V. Ramakrishna. 1987. Design of solid state fermentation for production of fungal metabolites on large scale. Biotechnol. Tech. 1:97–102.
10. Lonsane, B. K., N. P. Ghildyal, S. Budiartman and S. V. Ramakrishna. 1985. Engineering aspects of solid state fermentation. Enzym. Microbiol. Technol. 7:258–265.
11. Xaver Lipp [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://xaver-lipp.com/>.
12. Пичугин С., К. Оксененко Использование спирально-фальцевых силосов на территории Украины // ArCivE 2021. 2021. С. 430–437.