УДК 628.356

PURIFICATION OF WASTEWATER FROM THE BREWING INDUSTRY USING METHANE FERMENTATION TECHNOLOGY

O. Stotska
Institute of Postgraduate Education of the National University of Food Technologies

Key words:
Brewing
Methane fermentation
Waste
Wastewater
Biogas

Article history:
Received 10.03.2023
Received in revised form 21.03.2023
Accepted 07.04.2023

Corresponding author:
O. Stotska
E-mail:
marketing-uaan@ukr.net

ABSTRACT

The brewing industry generates a large amount of secondary material resources, namely: excess brewer's yeast, malt grain, malt sprouts, grain waste, protein sludge and a large amount of wastewater with varying degrees of organic pollution. These wastes contain a complex of nutrients, minerals and biologically active substances. Some of them (brewer's yeast, malt grain) are used as feed additives to the diet of farm animals as part of compound feed or in their native form.

The brewing industry is a branch of food industry with a high degree of water consumption and, accordingly, a large amount of wastewater generated in the production process. Wastewater from the brewing industry belongs to the category of highly polluted, therefore, for their effective cleaning, it is necessary to use suitable and economically beneficial technologies. Substances dissolved in water cannot be filtered or precipitated using coagulants, removed using flotation, etc. Some of the impurities, for example, proteins, can be removed by physical and chemical methods, but the main part of them is in the solution. Effective cleaning is possible only if complex compounds are destroyed directly in the wastewater. Existing cleaning technologies using physical and chemical methods are imperfect because they have low cleaning rates.

The best option for brewery wastewater treatment technology is the use of biotechnological cleaning methods. Such methods include methane fermentation. Methane fermentation is an anaerobic biochemical process that occurs under the influence of microorganisms of the genus Methanobacterium. This process leads to a significant reduction in the level of sewage pollution. The final products of methane fermentation are biogas and microbial protein with a high content of essential aminoacids.

For wastewater treatment of the brewing industry the use of methane fermentation technology was proposed, the final products of which are highly purified wastewater and biogas.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-2-5

ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ПИВОВАРНОЇ ГАЛУЗІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ МЕТАНОВОГО БРОДІННЯ

О. В. Стоцька
Інститут післядипломної освіти Національного університету харчових технологій

У пивоварній промисловості утворюється велика кількість вторинних матеріальних ресурсів: надлишкові пивні дріжджі, солодова дробина, солодові паростки, зернові відходи, білковий відстій і велика кількість стічних вод, що мають різний ступінь органічного забруднення. Ці відходи містять комплекс поживних, мінеральних і біологічно-активних речовин. Частина з них (пивні дріжджі, солодова дробина) використовуються як кормові добавки до раціону сільськогосподарських тварин у складі комбікормів або в нативному вигляді.

Пивоварна галузь відноситься до категорії харчової індустрії з високим ступенем споживання води та, відповідно, великою кількістю стічних вод, які утворюються в процесі виробництва. Стоки пивоварної галузі належать до категорії високозабруднених, тому для їх ефективного очищення необхідне застосування придатних та економічно вигідних технологій. Розчинені у воді речовини неможливо фільтрувати або осаджувати за допомогою коагулянтів, видаляти за допомогою флотації тощо. Частину забруднень, наприклад, білки, можна видаляти фізико-хімічними методами, але головна частина їх знаходиться в розчині. Ефективне очищення можливе лише за умови руйнування складних сполук безпосередньо у стічній воді. Існуючі технології очищення з використанням фізико-хімічних методів є недосконалими, тому що мають низькі показники очищення.

Оптимальним варіантом технології очищення пивоварних стоків є використання біотехнологічних методів, зокрема метанове бродіння, що являє собою анаеробний біохімічний процес, що відбувається під впливом мікроорганізмів роду Methanobacterium. Такий процес призводить до значного зниження рівня забрудненості стоків. Кінцевими продуктами метанового бродіння є біогаз і мікробний білок з високим вмістом незамінних амінокислот.

Для очищення стічних вод пивоварної галузі запропоновано використання технології метанового бродіння, кінцевими продуктами якої є високоочищені стічні води та біогаз.

Ключові слова: *пивоварне виробництво, метанове бродіння, відходи, стічні води, білковий відстій, біогаз.*

Постановка проблеми. Однією з найважливіших умов розвитку сучасних технологій харчової і переробної промисловості є створення безпечного екологічного виробництва шляхом використання безвідходних інноваційних технологій. Робота підприємств харчової і переробної промисловості пов’язана з виснаженням природних ресурсів та утворенням великої кількості відходів. Проблема полягає в тому, що в Україні практично не існує підприємств, що працюють за принципом безвідходних технологій, а проблема очищення стічних вод, що утворюються практично на кожному циклі виробництва, набула особливої гостроти.

Упродовж багатьох років підприємства харчової промисловості України практично не розглядали питання екологізації виробництва та раціональної утилізації відходів. Причинами такого явища є величезні затрати на будівництво нових очисних споруд і реконструкції існуючих.

Сьогоденна реальність дуже гостро ставить питання щодо входження українських виробників у європейську та світову спільноти з метою одержання сертифікатів міжнародного рівня не тільки якості продукції, а й екологічного стану підприємств. В умовах економічного та екологічного колапсу перед харчовою промисловістю України постало питання не тільки нарощування обсягів виробництва загальнодоступних соціальних продовольчих продуктів, а й забезпечення українських і європейських споживачів повноцінними за своїм хімічними складом та екологічно безпечними продуктами харчування на основі органічної сировини.

Інноваційно-інвестиційний план створення нових та удосконалення працюючих технологій має передбачати екологічні й енергоощадні технології, модернізацію існуючих технологій виробництва та розробку систем комплексної переробки відходів.

Комплексна переробка вторинних матеріальних ресурсів має надзвичайно швидкі темпи розвитку в Європі та США. Ця система являє собою замкнений цикл безвідходного виробництва, при належному функціонуванні якого підприємства отримують додаткові фінанси та відбувається процес суттєвого зниження негативного впливу виробничих потужностей на довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виробництво харчової продукції завжди супроводжується утворенням різноманітних відходів — рідких, твердих і газоподібних. Відходи, що містять у своєму складі білки, жири та амінокислоти, відносять до категорії вторинних матеріальних ресурсів. Вторинні матеріальні ресурси можуть повторно використовуватися у виробництві для отримання корисних продуктів. Стічні води, які утворюються на будь-якому харчовому виробництві, також відносяться до категорії вторинних матеріальних ресурсів (Домарецький, 1999). Але за статистикою близько 80% виробничих вод після закінчення технологічного процесу переводиться да категорії стічних вод і надходить у навколишнє середовище з низькими показниками очищення (Heavin, & Power, 2018).

Усі підприємства харчової промисловості споживають велику кількість води на різних етапах виготовлення продукції (Zhao, & Zhang, 2018). Кількість стічних вод, що утворюються на різних підприємствах харчової індустрії, наведено в табл. 1.

Таблиця 1. **Кількість стічних вод, що утворюється на підприємствах харчової промисловості**

Підприємство	Кількість стічних вод
Хлібозавод потужністю 30 т/добу	2,8 $м^3$/т виробів
Хлібозавод із кондитерським цехом потужністю 40 т/добу	3...4 $м^3$/т виробів
Макаронна фабрика потужністю 105 т/добу	5...6 $м^3$/т виробів
Завод із виробництва цукру-піску	2 $м^3$/т буряка
Завод первинного виноробства	0,2 $м^3$/т винограду
Завод вторинного виноробства (марочні вина)	28 $м^3$/т винограду
Завод із виробництва солоду	18 $м^3$/т солоду
Пивоварний завод	76 $м^3$/1000 дал пива

Дані табл. 1 свідчать, що найбільша кількість стічних вод утворюється на підприємствах пивоварної галузі. Існуючі системи очищення на пивзаводах — механічні пристрої, що не забезпечують очищення вод до показників скиду їх в каналізаційні мережі (Мелетьєв, & Тодосійчук, 2007).

Велика кількість підприємств має застаріле очисне обладнання, яке не дає змогу видалити зі стічних вод важкорозчинні органічні сполуки. Якщо стічні води не проходять потрібний цикл очистки, то при потраплянні до природних водойм відбувається окислення вуглеводів, білків і жирів за участю розчиненого кисню, який є одним з найважливіших факторів існування гідробіонтів. Унаслідок цього відбувається різке порушення динамічної рівноваги водних екосистем.

З метою запобігання негативним наслідкам скидання забруднених вод у природні водойми існують встановлені державні нормативи щодо їх складу. Показниками якості промислових вод, що скидаються у водойми господарсько-побутового і культурно-побутового призначення є: запах, забарвленість, вміст завислих речовин, величина pH, концентрація розчиненого кисню, температура, мінеральний склад тощо (Semkiv, & Ruchala, 2020).

Вищеозначені факти вказують на необхідність розробки та впровадження високоефективних ресурсоощадних технологій очищення стоків. Особливо гострою та актуальною ця проблема є на підприємствах, що споживають велику кількість води. До таких галузей харчової промисловості відноситься пивоварна індустрія.

При виробництві пива утворюється велика кількість вторинних матеріальних ресурсів — стічні води, пивна дробина, білковий відстій, надлишкові пивні дріжджі, вуглекислий газ тощо. За своїм складом вони є цінним джерелом білкових і мінеральних речовин, вуглеводів та вітамінів (Ferreira, & Pereira, 2020).

Деякі види відходів пивоваріння знайшли своє застосування в різних галузях агропромислового комплексу. Наприклад, на основі солодової дробини, розроблено технологію отримання білково-вітамінних добавок для введення їх в раціон курчат-бройлерів для швидкого приросту ваги (Heavin, & Power, 2018); з надлишкових пивних дріжджів шляхом пресування отримують дріжджі з 25% вмістом сухих речовин, що мають більше 50% білка, 40% вуглеводів і безазотистих речовин (Alfuraydi, & Al-Ansari, 2021).

Стічні води пивоваріння містять розчинні органічні речовини, що знаходяться у вихідній сировині — білки, вуглеводи, мінеральні речовини та дріжджі. Для ліквідації забруднень стічних вод, тобто для їх очистки необхідні особливі методи. Ці речовини неможливо фільтрувати або осаджувати за допомогою коагулянтів, видаляти з використанням процесу флотації тощо. Деяку частину забруднень, наприклад, білки, можна видаляти фізико-хімічними методами, але головна їх частина знаходиться в розчині, тому їх можливо видалити лише шляхом деструкції безпосередньо в стічній воді. Ніякі хімічні способи для цього не можуть бути застосовані, тому що в цьому разі відбувається хімічне забруднення залишками реагентів (Wang, & An, 2021).

Для руйнування органічних речовин у стічних водах пивоварної галузі можливим є застосування тільки біохімічного (або мікробіологічного) методу, адже кінцевими продуктами розкладу речовин є вуглекислий газ і вода.

Головною метою використання біохімічних методів очищення стічних вод є максимальне використання всіх поживних речовин, що містяться в стічній воді. Саме тому, для переробки вторинної сировини доцільно використовувати змішані культури мікроорганізмів, здатні в симбіозі утилізувати різні органічні сполуки (Chaisuwan, & Jantanasakulwong, 2020).

Застосування технології метанового бродіння передбачає утилізацію відходів з отриманням корисних продуктів як для потреб людини, так і для відгодівлі сільськогосподарських тварин. Кінцевими продуктами використання технології метанового бродіння при очищенні стічних вод є отримання цінного кормового білка й біогазу, що може бути використаний на підприємствах пивоварної галузі для технологічних і побутових потреб (Marwani, & Kurniawan, 2019).

Мета дослідження: розробка комплексної технології очищення стічних вод пивоваріння за допомогою технології метанового бродіння з отриманням біогазу та кормової мікробної біомаси.

Матеріали і методи. Об'єктом дослідження обрано стічні води пивоварної галузі, оскільки технологія їх утилізації та ефективної очистки є недосконалою.

Підготовка води здійснювалась згідно з ТУ У 29.2-31582737-001-2003. Концентрації солей визначали за стандартними методиками (Накорчевська, & Аргатенко, 2000).

Загальний вміст білків, якісний і кількісний склад амінокислот мікробної біомаси визначали за методикою (Redwejk et al., 2012) з використанням капілярного електрофорезу.

Вміст рослинної клітковини у кормовій мікробній біомасі визначали методом прямого вагового аналізу, сутність якого полягає в окисленні, руйнуванні та розчиненні різних хімічних сполук, крім клітковини, яку потім видаляють, висушують і зважують (Kumar, & Turner, 2015).

У дослідах з отримання кормової мікробної біомаси проводилося визначення вмісту незамінних амінокислот (Kubala, 2022).

Аналіз кількісного вмісту біогазу в газоподібній суміші здійснювався за спрощеною методикою, шляхом розподілу їх на дві частини — складники з пальними компонентами (вміщують метан і водень) та з непальними домішками (вуглекислий газ та азот). Детальні попередні аналізи показали, що при метановому зброджуванні стічних вод пивоваріння практично відсутні сірководень та азот, і, як наслідок, неспалену частину газів складає вуглекислота, що легко відділяється від метану шляхом пропускання газів через ємність розчином лугу. В пальних газах, що залишаються, міститься водень (не перевищує 1%), а основну частину складає метан. Отже, газоподібні продукти, що утворюються при метановому бродіння, практично складає суміш метану та вуглекислого газу, що розділяється за спрощеною методикою — шляхом пропускання через розчин лугу.

Викладення основних результатів дослідження. Основними результатами дослідження було встановлення оптимальних параметрів метанового бродіння: швидкості подачі середовища в апарат, кількості продукту, що утворюється та інших важливих показників, за якими роблять висновки щодо ходу метанової

ферментації та визначення необхідних параметрів контролю процесу. Перебіг метанового бродіння можна оцінити за визначенням pH культуральної рідини — це значення не повинно бути нижче 7. На практиці такий показник значення pH середовища означає, що бродіння не відхиляється у бік утворення кислот, а відбувається з утворенням нейтральних чи лужних продуктів, характерних для істинного процесу метанового бродіння.

Принципову схему зброджування стічних вод пивоварного виробництва зображено на рис. 1.

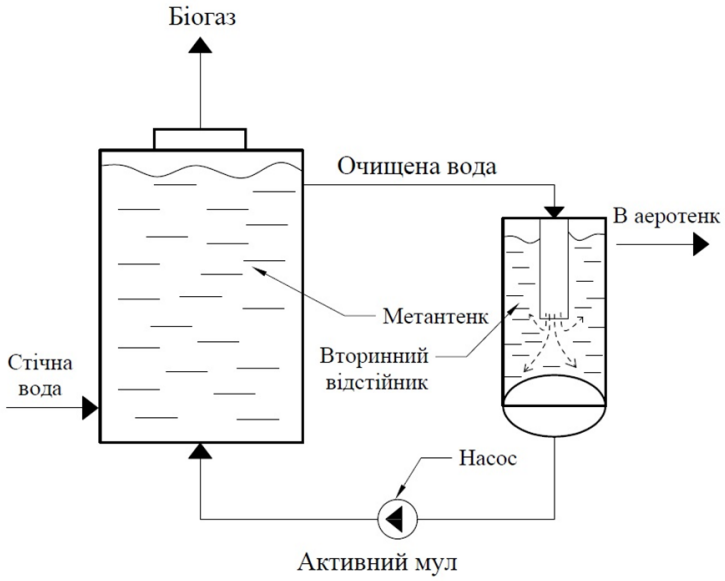

Рис. 1. Схема метанового зброджування стічних вод пивоварного виробництва

У табл. 2 наведено результати, що характеризують зміну основних показників періодичного метанового бродіння стічних вод пивоварного підприємства. Проби взяті в період мийки обладнання, коли забруднення стічних вод є високим та сягає 2700 мг O_2/л за ХСК.

Таблиця 2. **Основні показники процесу метанового бродіння стічних вод пивоварного виробництва в періодичному режимі**

Показники		ХСК, мг O_2/л	ЛЖК, г/л	Молочна кислота, г/л	pH	Об'єм газу, л/л	Співвідношення CH_4:CO_2
Початкові		2700	0,3	1,5	7,2	–	–
Після посіву		2100	0,3	1,1	7,1	–	–
Тривалість бродіння, діб	1	1900	0,3	1,0	7,2	0,62	–
	2	–	–	–	7,3	2,4	–
	4	1700	1,8	1,4	7,1	3,1	80:20
	6	–	–	–	7	3,0	76:24
	8	1400	2,4	1,7	7,4	1,8	81:19
	10	–	–	–	7,2	1,0	–

Продовження таблиці 2

	12	1100	4,1	1,5	7,3	0,4	70:30
	14	–	–	–	7,2	0,32	–
	16	750	4,4	1,9	7,2	0,24	50:50

Аналіз табл. 2 показує, що в досліджуваних стічних водах міститься невелика кількість летких жирних кислот — 0,3 г/л. Джерела походження можуть бути різними. Частково вони утворюються в результаті розвитку мікроорганізмів у стічній воді. Молочна кислота завжди присутня в стічних водах пивзаводів, її концентрація у цьому різі складає 1,5 г/л. Присутність молочної кислоти в стічних водах будь-якого походження є сприятливою умовою для процесу метанової ферментації, тому що вона легко перетворюється в піровиноградну кислоту (ПВК), яка є одним з попередників утворення метану.

Результати досліджень, наведені в табл. 2, показують, що зниження ХСК у початковий період ферментації було значним: з 2700 до 2100 мг/л. Зменшення показників відбувається за рахунок споживання хімічних речовин, що не враховувалися в цьому досліді, — амінокислот, білків і вищих жирних кислот. Зниження ХСК відбувалося протягом 16 діб, після чого метанове бродіння фактично припинилося, адже кількість газів, що виділялася, незначна (0,24 л/л). Кінцеве ХСК складало 750 мг/л. Аналіз проведених досліджень вказує на високий ступінь очищення — 75%.

Результати, отримані в ході експериментальних досліджень процесу періодичного метанового бродіння, дають уяву про те, наскільки цей процес є ефективним при ліквідації забруднень стічних вод пивоварної промисловості.

Для визначення практичної цінності й економічної доцільності втілення такого методу на виробництві проведено досліди щодо кількісного та якісного складу газоподібних продуктів, що утворюються в процесі метанового зброджування. Так, загальний об'єм газів, що утворився, складає більше 12 л/л. Цей показник є вагомою величиною для оцінки економічної ефективності заходу.

Аналізуючи динаміку показників метанового бродіння стічних вод пивоварного виробництва, слід зазначити, що суттєве зниження значення ХСК відбувалося в перші вісім діб від початку бродіння. Для повної деструкції органічних речовин необхідно створити особливі умови: оптимальне співвідношення активного мулу та вуглеводів, при якому досягається рівновага між кількістю попередників метану та швидкістю їх перетворення в метан. В усіх інших випадках відбувається перетворення попередників метану в продукти неповного анаеробного окислення — нижчі жирні кислоти. Процес метанового бродіння порушується і направити його у зворотному напрямку неможливо. Це явище гальмування процесу утворення метану можна умовно назвати ефектом репресії метаногенезу. Його механізм такий: швидкість деструкції простих вуглеводів є надто високою, що призводить до інтенсивного накопичення попередників метану та перетворення їх надлишків у продукти неповного окислення. Для вибору оптимального режиму ферментації необхідним є використання різної кількості активної культури метаноутворюючих бактерій. При виконанні серії дослідів відбувалося інтенсивне бродіння, однак воно доходило лише до стадії утворення кислот і в жодному разі не переходило в метанове бродіння.

Концентрація летких жирних кислот, як видно з результатів досліду, в культуральній рідині зростає, незважаючи на те, що за всіма показниками процес ферментації відбувався в межах норми. Це свідчить про те, що частина попередників метану, навіть при порівняно невисокій кількості вуглеводів у зброджувальному середовищі, перетворюється в продукти напіврозкладу. Це підтверджує нестійкий характер метанового бродіння на середовищах з вуглеводами та велику ймовірність можливості утворення кислот.

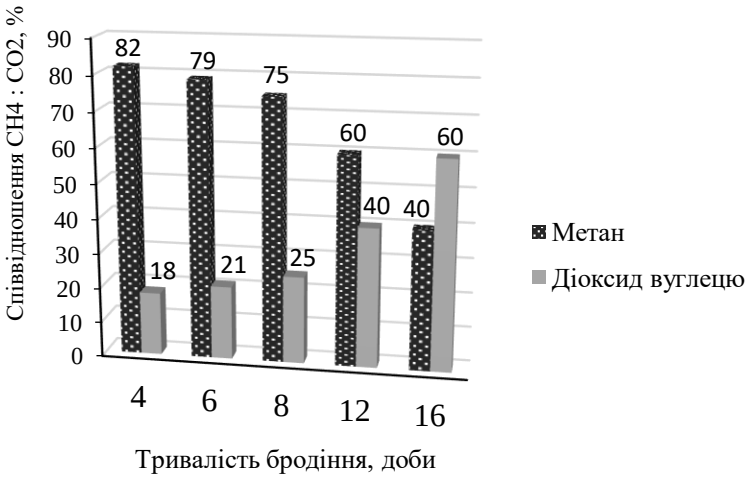

Рис. 2. Динаміка газоутворення при зброджуванні стічних вод пивоварного виробництва

Аналіз рис. 2 показує, що співвідношення газів, тобто відносна кількість метану, протягом майже всього періоду бродіння було майже постійним. З урахуванням отриманого співвідношення CH_4:CO_2, горіння суміші відбувається аналогічно горінню чистого метану, що є свідченням того, що цей вид біогазу може бути використаний як біопаливо.

Перевагою дослідження параметрів метанового бродіння при періодичному процесі є практично ідеальне встановлення оптимальних показників бродіння в лабораторних умовах. Але на практиці, при впровадженні таких технологій у виробництво, необхідним є застосування проточного (безперервного) режиму культивування.

Найважливішим параметром перебігу процесу проточного культивування є встановлення оптимальних температурних параметрів метанового бродіння. Відомим є факт, що метанове бродіння може відбуватися при різних температурах, але при різких змінах процес може бути порушений.

Для вибору оптимального температурного режиму процесу було проведено метанове зброджування стічних вод пивоварної галузі при мезофільному та термофільному режимах.

При мезофільному режимі, при температурі 35 °С через 10 діб від початку ферментації, значення pH культуральної рідини починало зменшуватися, що свідчило про порушення процесу. Відбувалося явище, відоме під назвою «закисання

середовища». При припиненні подачі посівного матеріалу реакція середовища поступово змінювалася на лужну, а потім — нормалізувалася. Зниження рівня pH свідчить про те, що прийнята швидкість протоку є завеликою, тому органічні речовини не встигали зброджуватися так, щоб забезпечити відповідні показники процесу метанового бродіння.

При температурі 45 °С процес метанової ферментації відбувався протягом 20 діб і весь час значення pH залишалось незмінним — 9,0...9,2.

У процесі зброджування із 100 мл стічних вод утворювалось 650...700 $см^3$ біогазу. Така кількість біогазу є досить значною для пивоварної галузі. Попередні дослідження при температурі 40 °С дають вихід біогазу у межах 450...500 $см^3$ (Домарецький, 1999). Підвищення температури на 5 °С дає змогу оптимізувати процес метанового бродіння й отримати значно більший вихід біогазу. Для встановлення кількісних показників вмісту чистого метану біогаз був пропущений через газгольдер. У ході досліду було встановлено, що об'єм чистого метану складає 520...550 $см^3$. Ця кількість біогазу є значною для покриття енерговитрат підприємства.

Початкове значення ХСК стічних вод пивоварної галузі становило 2700 мг O_2/л, а після метанового бродіння — 760 мг O_2/л.

При досягненні встановленого режиму, тобто стабільного значення pH та інших показників метанової ферментації, проведено аналізи культуральної рідини. Так, значення pH було типовим для метанового бродіння, тому ступінь деструкції сухих речовин для цього виду середовища вважається цілком прийнятним.

Найважливіший показник ступеня очищення стічних вод — значення ХСК, оскільки його зміна пов'язана з деструкцією органічних речовин. У цій серії дослідів хімічне споживання кисню вказує на високий ступінь очистки. Кінцеве значення ХСК зброджених стічних вод становить 760 мг O_2/л. Однак скидання стічних вод у загальну каналізаційну мережу з таким значенням ХСК є недопустимим. Для досягнення оптимальних параметрів очищення доцільним є використання аеробної ферментації як додаткової стадії очищення.

Аеробне очищення стічних вод є оптимальним при параметрах забруднення нижче 1000 мг O_2/л.

Проведені дослідження дають такі результати: після 24 год аерації ХСК стічних вод становило 300 мг O_2/л, а після 96 годин — 20 мг O_2/л. Результати досліджень наведено в табл. 3.

Таблиця 3. **Показники аеробної ферментації**

Тривалість бродіння, діб	Хімічне споживання кисню, мг O_2/л	Тривалість, год
1	760	0
24	360	12
48	300	24
72	80	36
96	20	48

Проведений аналіз дослідів показав, що застосування технології метанового бродіння для очищення стічних вод пивоварної галузі з використанням технології

метанового бродіння надає можливість суттєво знизити забрудненість стоків та отримати біогаз, використання якого забезпечує значну економію коштів на підприємстві.

Висновки

Аналітичний огляд сучасного екологічного стану підприємств пивоварної промисловості показав, що стічні води виробництва мають високий ступінь забруднення. Для їх очищення найбільш доцільним є використання процесу метанового бродіння.

Отримано оптимальні показники процесу метанового зброджування стічних вод пивоварного виробництва в періодичному режимі, проаналізовано їх динаміку та встановлено критичні точки перебігу процесу, при яких метанове бродіння припиняється й подальше застосування процесу є малоефективним.

Після закінчення процесу метанового бродіння стічні води мають високий ступінь очищення, що забезпечує їх подальше використання в оборотній системі водопостачання підприємств пивоварної галузі.

На прикладі утилізації стічних вод пивоваріння доведено, що кількість біогазу, отриманого в процесі метанового зброджування, є достатньою для покриття значних виробничих енерговитрат підприємства.

Література

Домарецький, В. А. (1999). *Технологія солоду та пива*. К.: Урожай.

Мелетьєв, А. Є., Тодосійчук, С. Р., & Кошова, В. М. (2007). *Технохімічний контроль солоду, пива та безалкогольних напоїв*. Вінниця: Нова книга.

Накорчевська, В. Ф., Аргатенко, Т. В. (2000). *Хімія води і мікробіологія.* Вправи і методичні вказівки до їх виконання. К.: КНУБА.

Никулишин, І. Є., Дзіняк, Б. О., Піх, З. Г., Оробчук, О. М., & Кічура, Д. Б. (2019). *Біохімія бродильних виробництв*. Львів: видавництво Т. Сороки.

Справочник по свойствам, методам анализа и очистке воды. В. 2 ч. (1980). К.: Наукова думка.

Alfuraydi, A. A., Devanesan, S., Al-Ansari, M., Al-Salhi, M. S., Ranjitsingh, A. J. (2019). Eco-friendly green synthesis of silver nanoparticles from the sesame oil flour and its potential anticancer and antimicrobial activities. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 192, 83—89. https://doi.org/10.1016/ j.jphotobiol. 2019.01.011.

Białecka-Florjańczyk, E., Florjańczyk, Z. (2007). Solubility of plasticizers, polymers and environmental pollution. T. Letcher (Ed.), Biology, Elsevier, New York, 397—407. doi: 10.1016/B978-044452707-3/50024-0.

Global Alternative Proteins Market (2020). Market Insights, Covid-19 Impact, Competition and Forecast (2020—2025). Режим доступу: https://azothanalytics.com/report/food-beverage-and-agriculture/global-alternative-proteins-market-analysis-by-product-application-by-region-by-country-2020-edition-market-insights-covid-19-impact-competition-and-forecast-2020-2025 (access date:7.10.2021).

Ferreira, S., Pereira, R., Wahl, S. A., Rocha I. (2020). Metabolic engineering strategies for butanol production in Escherichia coli. Biotechnol. Bioeng., 117(8), 2571—2587. doi: 10.1002/bit.27377.

Heavin, C., Power, D. J. (2018). Challenges for digital transformation-towards a conceptual decision support guide for managers. *Journal of Decision Systems*. *Journal of Decision Systems*, 27, 38—45. https://doi.org/10.1080/12460125.2018.1468697.

Kamiloglu, S., Pasli, Ayca A., Ozcelik, B., Camp John,V., Capanoglu, E. (2015). Influence of different processing and storage conditions on in vitro bioaccessibility of polyphenols in black carrot jams and marmalades. *Food Chemistry*, 186, 74—82. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.12.046.

Kumar, M., Turner, S. (2015). Protocol: a medium-throughput determination of cellulose content from single stem pieces of Arabidopsis thaliana. *Plant Methods*, 11. https://doi.org/10.1186/s13007-015-0090-6.

Marwani, E., Kurniawan, I. (2019). Biomass and Algal Oil Productivity with Fatty Acid Profiles of Botryococcus Sp. Cultures Under Different Concentrations of Nitrogen. *Indian Journal of Science and Technology*, 12(47). doi: 10.17485/ijst/2019/v12i47/148651.

Mas, A. L., Brigante, F. I., Salvucci, E., Ribotta, P., Martinez, M. L., Wunderlin, D. A., Baroni, M. V. (2022). Novel cookie formulation with defatted sesame flour: Evaluation of its technological and sensory properties. Changes in phenolic profile, antioxidant activity, and gut microbiota.

Reshef, O., Aharonovich, I., Armani, A. M., Gigan, S., Grange, R., Kats, M., Sapienza, R. (2020). Nature Reviews Materials, 5, 253—256.

Semkiv, M. V., Ruchala, J., Dmytruk, K. V., Sibirny, A. A. (2020). 100 Years later, what is new in glycerol bioproduction? *Trends Biotechnol*., 38(8), 907—916. doi:10.1016/j.tibtech.2020.02.001.

Shah, B. R., Li, B., Sabbah, H. A., Xu, W., Mraz, J. (2020). Effects of prebiotic dietary fibers and probiotics on human health: With special focus on recent advancement in their encapsulated formulations. *Trends in Food Science & Technology*, 102. 178—192. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.06.010.

Wang, W., An, C., Yao, Y., Meng, X., Gao, S. S. (2021). De novo biosynthesis and gram-level production of m-cresol in Aspergillus nidulans. *Appl. Microbiol. Biotechnol*., 105, 6333—6343. doi: 10.1007/s00253-021-11490-w.

Zhao, E. M., Zhang, Y., Mehl, J., Park, H., Lalwani, M. A., Toettcher, J. E., Avalos, J. L. (2018). Optogenetic regulation of engineered cellular metabolism for microbial chemical production. *Nature*, 555, 683—687. doi:10.1038/nature26141.

Zhou, Z. Y., Yang, S. T., Moore, C. D., Zhang, Q. H., Peng, S. Y., Li, H. G. (2020). Acetone, butanol, and ethanol production from puerariae slag hydrolysate through ultrasound-assisted dilute acid by Clostridium beijerinckii YBS3. *Bioresour. Technol*., 316, 123899. doi: 10.1016/j.biortech.2020.123899.

Martinez-Medina, G. A., Chávez-González, M. L., Kumar, Verma D. et al. (2021). Bio-funcional components in mushrooms, a health opportunity: Ergothionine and huitlacohe as recent trends. *Journal of Functional Foods*, 77, 104326. Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1756464620305508?via%3Dihub (access date 07.10.2021).

Chaisuwan, W., Jantanasakulwong, K., Wangtueai, S., Phimolsiripol, Y., Chaiyaso, T., Techapun, C. et al. (2020). Microbial exopolysaccharides for immune enhancement: fermentation, modifications and bioactivities. *Food Bioscience*, 35:100564. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100564.

Kubala, J. (2022). Essential Amino Acids: Definition, Benefits, and Food Sources. Healthline. Retrieved from https://www.healthline.com/nutrition/essential-amino-acids.

Kumar, M., Turner, S. (2015). Protocol: a medium-throughput determination of cellulose content from single stem pieces of Arabidopsis thaliana. *Plant Methods*, 11. https://doi.org/10.1186/s13007-015-0090-6.

Zhao, E. M., Zhang, Y., Mehl, J., Park, H., Lalwani, M. A., Toettcher, J. E., Avalos, J. L. (2018). Optogenetic regulation of engineered cellular metabolism for microbial chemical production. *Nature*, 555, 683—687. doi:10.1038/nature26141.