

# **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ: ЕКОНОМІЧНИЙ, ТЕХНІКО- ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТИ**

**Колективна монографія**

**Полтава**

**2019**



УДК 330

Е 65

*Рекомендовано до друку вченою радою Полтавської державної аграрної академії (Україна) (протокол № 17 від 15.05.18 р.).*

*Рекомендовано до друку вченою радою Опольського університету (Польща) (протокол № 01/05/2018 від 28.05.18 р.).*

**Рецензенти:**

С. В. Іванов – член-кореспондент НАН України, заслужений діяч науки і техніки України, доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри фінансів і маркетингу ДВНЗ “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”.

В. І. Гавриш – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації і технічного сервісу Миколаївського державного аграрного університету.

О. В. Семко – доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, академік Академії будівництва України, завідувач кафедри архітектури та міського будівництва Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

В. Л. Курило – доктор сільськогосподарських наук, професор, член-кореспондент НААН, професор кафедри сільськогосподарських машин Вінницького аграрного університету.

Даріуш Сушанович – кандидат технічних наук, заступник директора Інститута технічних наук Опольського університету.

**Енергоефективність та енергозбереження: економічний, техніко-технологічний та екологічний аспекти** : колективна монографія / Кол. авторів; за заг. ред. П. М. Макаренка, О. В. Калініченка, В. І. Аранчій. Полтава : ПП “Астроя”, 2019. 603 с.

У монографії викладено теоретико-методологічні засади та методичні й практичні рекомендації енергоефективності і енергозбереження на національному, галузевому, регіональному рівнях і на підприємствах за видами економічної діяльності. Охоплено питання розвитку енергетичної безпеки ринково розвинених країн і України, використання нетрадиційних відновлювальних і альтернативних джерел енергії. Запропоновано організаційно-економічні, технологічні, технічні та екологічні рішення подальшого розвитку енергоефективності й енергозбереження. Сформовано пропозиції щодо економічної та енергетичної оцінки та ефективності використання теплових, механічних, біологічних і природних джерел енергоресурсів, їх енергетичного аудиту і консалтингу в господарській та галузевій структурі національної економіки.

Розрахована на здобувачів вищої освіти, викладачів, науковців, фахівців з енергоефективності і енергозбереження різних форм і напрямів економічної діяльності.

**ISBN 978-617-7669-24-0**

**Energy efficiency and energy saving: economic, technical, technological and ecological aspects** : collective monograph / Authors edited: P. M. Makarenko, O. V. Kalinichenko, V. I. Aranchii. – Poltava : PC “Astraya”, 2019. – 603 p.

The collective monograph outlines theoretical and methodological researches, and practical aspects of implementing the energy efficiency and energy saving technologies at national and regional levels and certain enterprises and branches of economic activity. The peculiarities of the global energy supply development and the prospects of renewable energy sources’ implementation are revealed, the methodological and practical concepts of efficient energy consumption are proposed. The theoretical concepts and propositions provided, allow conducting a complex estimation of various technologies and technological processes in different branches of the national economy of Ukraine. The ways of optimizing the energy consumption, and its influence on the development of national economy, the ecological state of the territories, and forming the technical and technological levels of management are investigated.

The materials of this collective monograph may be useful to scholars, applicants of higher education, teachers of higher educational establishments, as well as public authorities, specialists and managers of business entities.

**ISBN 978-617-7669-24-0**

© ПДАА

© Колектив авторів, 2019

|                                                                                                                                         |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ .....</b>                                                                                                          | <b>7</b> |
| <b>ПЕРЕДМОВА .....</b>                                                                                                                  | <b>9</b> |
| <b>РОЗДІЛ 1. ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА: ДОСВІД РИНКОВО-РОЗВИНЕНИХ КРАЇН, СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ УКРАЇНИ</b>                                      |          |
| 1.1. Енергетична безпека ринково-розвинених країн: державна політика та інструменти регулювання енергоефективності .....                | 11       |
| 1.2. Енергетична безпека країни: світовий досвід та вітчизняні реалії .....                                                             | 15       |
| 1.3. Перспективи та проблеми гармонізації енергетичного законодавства України зі стандартами Європейського Союзу .....                  | 18       |
| 1.4. Енергетична безпека України в умовах євроінтеграції: проблеми.....                                                                 | 24       |
| 1.5. Енергетична концепція Сергія Подолинського у контексті розвитку низьковуглецевої економіки ....                                    | 30       |
| 1.6. Оцінка сучасного стану енергетичної безпеки у світі .....                                                                          | 36       |
| 1.7. Оцінка сучасного стану паливно-енергетичного комплексу та енергетичної безпеки України ....                                        | 40       |
| 1.8. Оцінки кластерних ініціатив в контексті забезпечення енергетичної безпеки соціально-економічних систем .....                       | 45       |
| 1.9. Ретроспективний аналіз підходів до енергетичного планування на місцевому рівні .....                                               | 51       |
| 1.10. Передумови енергетичної бідності в контексті трансформації взаємовідносин на енергетичному ринку .....                            | 59       |
| 1.11. Соціо-енерго-еколого-економічна система промислового регіону: аспекти енергетичної безпеки                                        |          |
| 1.12. Енергозберігаюча стратегія завдяки економному використанню енергоресурсів при проведенні досліджень продуктивних свердловин ..... | 69       |
| 1.13. Перспективні напрямки реалізації енергетичної безпеки України.....                                                                | 72       |
| 1.14. Напрями забезпечення енергетичної безпеки України .....                                                                           | 80       |
| <b>РОЗДІЛ 2. ВИКОРИСТАННЯ НЕТРАДИЦІЙНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ТА АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ</b>                                            |          |
| 2.1. “Зелена” енергетика як провідна ланка “зеленої” економіки: досвід Європейського Союзу .....                                        | 85       |
| 2.2. Потенціал відновлюваних джерел енергії в Україні .....                                                                             | 92       |
| 2.3. Відновлювальні джерела енергії та їх вплив на збалансований сталий розвиток господарського комплексу регіонів України .....        | 97       |
| 2.4. Економічна оцінка використання відновлюваних джерел енергії .....                                                                  | 104      |
| 2.5. Відновлювальні джерела енергії: тенденції розвитку, інвестиції, smartgrid .....                                                    | 107      |
| 2.6. Використання відновлюваних джерел енергії в Україні .....                                                                          | 113      |
| 2.7. Аналіз потенціалу відновлюваних джерел енергії на територіях непридатних для сільськогосподарського виробництва .....              | 116      |
| 2.8. Використання біомаси в енергетичних цілях (досвід Польщі) .....                                                                    | 120      |

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.9. Стале виробництво твердого біопалива в Україні. Галузеві рішення .....                                                         | 124 |
| 2.10. Перспективні напрями використання відновлюваної енергетики у сільському господарстві України                                  | 130 |
| 2.11. Створення енергоефективних технологій очищення стічних вод з одночасним одержанням енергоносіїв в біопаливних елементах ..... | 136 |
| 2.12. Біогаз: основні властивості, стан та перспектива виробництва біогазу .....                                                    | 143 |
| 2.13. Обґрунтування проекту створення біоенергетичного селища на території України .....                                            | 150 |
| 2.14. Шляхи енергозбереження при забезпеченні мікроклімату учбових приміщень .....                                                  | 155 |

### **РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА, ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АУДИТ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ І ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ**

|                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Класифікація видів енергії в процесі виробництва продукції рослинництва .....                                                                                    | 167 |
| 3.2. Особливості енергоспоживання в рослинництві .....                                                                                                                | 171 |
| 3.3. Методика оцінки енергетичної ефективності виробництва продукції рослинництва .....                                                                               | 177 |
| 3.4. Методичні підходи до еколого-економічної оцінки збитків від деградації земель з врахуванням основних факторів енергоємності їх родючості .....                   | 180 |
| 3.5. Впровадження енергоощадних технологій вирощування сільськогосподарських культур .....                                                                            | 188 |
| 3.6. Енергозабезпечення і енергоефективність галузі тваринництва та кормовиробництва .....                                                                            | 193 |
| 3.7. Оцінка енергетичної ефективності робочих машин поточкових ліній очищення зерна .....                                                                             | 201 |
| 3.8. Енергетична оцінка матеріальних активів .....                                                                                                                    | 206 |
| 3.9. Оптимізація енергопостачання технічної енергетичної системи з використанням рангового аналізу .....                                                              | 211 |
| 3.10. Розширення раливної бази дизелів шляхом застосування газодизельного циклу .....                                                                                 | 216 |
| 3.11. Перспективи розвитку об'єднання співвласників багатоквартирного будинку для забезпечення енергоефективного використання енергоресурсів домогосподарствами ..... | 222 |
| 3.12. Особливості забезпечення надійності електропостачання споживачів у ринкових умовах на регіональних електроенергетичних ринках .....                             | 229 |
| 3.13. Консалтинг енергоефективності.....                                                                                                                              | 234 |
| 3.14. Теоретичні засади аналізу енергетичної та екологічної ефективності металургійних підприємств в Україні .....                                                    | 238 |
| 3.15. Оцінка конкурентних позицій підприємств, діючих на оптовому енергоринку України .....                                                                           | 242 |
| 3.16. Інвестиційні та виробничі аспекти енергетичного контролінгу .....                                                                                               | 248 |
| 3.17. Перспективи застосування енергетичного аудиту в аграрних підприємствах .....                                                                                    | 252 |
| 3.18. Ефективність провадження енергоефективних заходів в аспекті техніко-економічного оцінювання .                                                                   | 258 |
| 3.19. Використання енергозберігаючих технологій як механізм підвищення рівня економічної безпеки в сільськогосподарських підприємствах .....                          | 262 |
| 3.20. Структуризація методів фінансування проектів у сфері енергозбереження: український вимір ...                                                                    | 265 |

|                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.21. Формування системи оцінювання стимулювання персоналу в контексті дослідження поведінки агентів з питань з енергозбереження .....                 | 271 |
| 3.22. Інституційні та економічні аспекти основних напрямів досліджень в області енергоефективності .                                                   | 276 |
| 3.23. Енергоефективність та енергозбереження в Україні: регіональні аспекти .....                                                                      | 280 |
| 3.24. Промислова політика енергозбереження та енергоефективності на засадах сталого розвитку та економічного націоналізму.....                         | 283 |
| 3.25. Використання засобів маркетингу у стимулюванні енергозбереження та енергоефективності .....                                                      | 287 |
| 3.26. Енергозбереження як основний індикатор управління інвестиційною привабливістю підприємств машинобудування .....                                  | 294 |
| 3.27. Підвищення енергоефективності економіки України за рахунок зниження енерговитрат в житлово-комунальному господарстві .....                       | 298 |
| 3.28. Управління відтворенням біоенергетичних ресурсів у сільському господарстві .....                                                                 | 301 |
| <b>РОЗДІЛ 4. ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОЦІНКА БІОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ В ГАЛУЗЯХ І ГОСПОДАРСЬКІЙ СТРУКТУРІ НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ</b>          |     |
| 4.1. Енергозберігаючі аспекти органічного землеробства .....                                                                                           | 304 |
| 4.2. Енергозберігаючі технології виробництва цукру .....                                                                                               | 308 |
| 4.3. Енергозберігаючі технології та технічні рішення при виробництві капсульовано- гранульованих мінеральних добрив.....                               | 316 |
| 4.4. Енергозберігаюча технологія виробництва добрива-меліоранта зі шламових відходів підприємств теплоенергетики .....                                 | 322 |
| 4.5. Енергозберігаюча система обробітку ґрунту на базі електрифікованого мотоблоку .....                                                               | 327 |
| 4.6. Ефективність використання індукційного нагріву в області металообробки .....                                                                      | 335 |
| 4.7. Інтенсифікація теплообмінних процесів акустичним методом .....                                                                                    | 342 |
| 4.8. Удосконалення енергоощадних технологій виготовлення алюмінієвих сплавів .....                                                                     | 347 |
| 4.9. Оцінка біоенергетичного потенціалу регіонів України (на прикладі Полтавської області) .....                                                       | 352 |
| 4.10. Використання побічної продукції, відходів і залишків сільського господарства для виробництва твердих біопалив .....                              | 358 |
| 4.11. Вирощування енергетичних культур для виробництва твердих біопалив та теплової енергії. Енергетичний, екологічний та економічний аспекти .....    | 368 |
| 4.12. Динаміка зміни органічного вуглецю ґрунту при вирощуванні енергетичних культур: наслідки для залишків парникових газів та родючості ґрунту ..... | 376 |
| 4.13. Економічна і енергетична ефективність технологічних заходів при вирощуванні кукурудзи та сорго цукрового для виробництва біогазу .....           | 380 |
| 4.14. Вплив умов вирощування та біометричних показників рослин проса прутноподібного на урожайність і вихід біопалива .....                            | 385 |
| 4.15. Сортова специфіка сої та потенціал їх рослинних решток .....                                                                                     | 395 |

|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.16. Організація формування й перспективи використання біоенергетичного потенціалу підприємств агробізнесу ..... | 398 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## **РОЗДІЛ 5. ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ В ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ**

|                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. Перетворення вітрової енергії безпосередньо в теплоту .....                                                                                 | 401 |
| 5.2. Теплонасосна технологія .....                                                                                                               | 407 |
| 5.3. Когенераційна технологія перетворення енергії вітру .....                                                                                   | 411 |
| 5.4. Технології використання сонячної енергії для ПДГ .....                                                                                      | 418 |
| 5.5. Енергетичні витрати та обґрунтування параметрів жолоба робочих русел комбінованого очисника вороху цукрових буряків .....                   | 426 |
| 5.6. Традиційні тверді біопалива .....                                                                                                           | 436 |
| 5.7. Альтернативні біопаливні матеріали: опале листя та композити на основі твердих рослинних відходів .....                                     | 437 |
| 5.8. Експериментальні дослідження виготовлення пелет з опалого листя у відкриту матрицю.....                                                     | 438 |
| 5.9. Експериментальне дослідження виготовлення біопалива з опалого листя, рослинних відходів та композитів на їх основі в закритій матриці ..... | 441 |
| 5.10. Удосконалена технологія виготовлення матриць пелетоутворюючих пресових пристроїв .....                                                     | 447 |
| 5.11. Приклад визначення витрати композитного біопалива у газогенераторі автономної енергетичної установки .....                                 | 451 |

## **РОЗДІЛ 6. ЕКОЛОГІЧНІ ВИМОГИ ТА ЇХ ВИРІШЕННЯ В ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ**

|                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1. Екологічні витрати та енергозбереження: облікові аспекти .....                                                                                              | 454 |
| 6.2. Роль біомаси для досягнення глобальних та національних цілей зі зниження викидів парникових газів .....                                                     | 457 |
| 6.3. Забезпечення екологічних вимог при виробництві енергії з біомаси .....                                                                                      | 463 |
| 6.4. Енергетичні властивості біомаси та економічна ефективність виробництва теплової енергії .....                                                               | 469 |
| 6.5. Аналіз впливу впровадження міжнародних екологічних обмежень на енергоефективність у розрізі галузевої структури національної економіки .....                | 475 |
| 6.6. Екологічні аспекти спалювання низькокалорійних органічних палив .....                                                                                       | 483 |
| 6.7. Екологічні аспекти сільськогосподарського виробництва .....                                                                                                 | 489 |
| 6.8. Екологічні аспекти використання біогазового потенціалу твердих побутових відходів .....                                                                     | 494 |
| 6.9. Використання концентрованих відходів тваринницьких ферм для отримання біогазу .....                                                                         | 499 |
| 6.10. Підвищення енергетичної ефективності шляхом ресурсозбереження .....                                                                                        | 505 |
| 6.11. Енергоефективність та екологізація логістичної діяльності .....                                                                                            | 510 |
| 6.12. Інноваційні технології ресурсозбереження в технологіях очищення забрудненого водного середовища .....                                                      | 516 |
| 6.13. Високоєфективні системи енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками: енергетичний, економічний та екологічний аспекти ефективності ..... | 524 |
| 6.14. Еколого-економічні системи опалення .....                                                                                                                  | 531 |

|                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.15. Математична модель аналізу матеріальних потоків міського середовища .....       | 536        |
| 6.16. Відходи вуглевидобутку та вуглезбагачення стан та технології використання ..... | 544        |
| <b>ПІСЛЯМОВА .....</b>                                                                | <b>551</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>                                               | <b>553</b> |

## 6.9. Використання концентрованих відходів тваринницьких ферм для отримання біогазу

© Бублієнко Н. О.

*к.т.н., доцент, доцент кафедри екології та збалансованого природокористування,  
Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна*

© Семенова О. І.

*к.т.н., доцент, завідувач кафедри екології та збалансованого природокористування,  
Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна*

© Сулейко Т. Л.

*асистент кафедри біотехнології і мікробіології,  
Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна*

Сталий соціально-економічний розвиток будь-якої держави, в тому числі й України, має супроводжуватись створенням та гарантуванням безпечного стану довкілля для життєдіяльності як суспільства, так і кожної пересічної людини, спираючись на систему правових приписів, яка базувалась би на гуманістичних та демократичних ідеях та принципах міжнародного права.

На сучасному етапі розвитку суспільних відносин в Україні питання щодо управління в галузі охорони довкілля, раціонального природокористування та забезпечення екологічної безпеки користується підвищеним інтересом з огляду на кризові екологічні показники в державі [1]. У цьому контексті взаємовідносини між сучасним виробництвом і природою виходять на новий рівень сприйняття. Ці взаємовідносини стосуються виробництва, розподілу, споживання та, особливо, утилізації відходів.

Сьогодні мало просто забезпечити виробництво необхідною суспільству кількістю продукції – відходи, що утворюються при виробництві цієї продукції повинні бути раціонально використані з досягненням найбільшого економічного, екологічного та соціального ефекту [2].

Кінцевою метою раціонального природокористування повинно бути максимальне залучення у виробництво сировини: чим менша відходоємність виробництва, тим вищий рівень розвитку продуктивних сил, тим більш економічно ефективно працює виробництво.

Так, у результаті розвитку агропромислового комплексу України виникають питання не тільки переробки сировини, але й утилізації відходів. І особливо гостро це питання стоїть щодо утилізації відходів тваринницьких ферм – гною. Щорічно в АПК України утворюється близько 109 млн. т відходів, з яких 49 млн. т неефективно утилізуються або захоронюються, а 60 млн. т використовується з метою подальшої переробки [2]. До того ж, органічні відходи (такі як гній) можуть бути сприятливим середовищем для розвитку патогенної мікрофлори, містити насіння бур'янів та інших забруднень.

Сільське господарство має більший вплив на природне середовище, ніж будь-яка інша галузь народного господарства. Тому дослідження способів використання відходів тваринницьких ферм, у тому числі як джерел енергії є надзвичайно актуальним в контексті сталого розвитку регіонів.

На сьогодні немає єдиної технології переробки органічних відходів. В Україні зазвичай використовують екстенсивні та аераційні способи, що не можуть забезпечити необхідного зниження концентрації забруднень.

У багатьох країнах світу для утилізації та знешкодження органічних відходів використовують метанову ферментацію. Відомо, що відходи сільського господарства легко піддаються метановому бродінню і є значним резервом сировини для отримання метану. Для переробки цих відходів пропонується різне апаратне оформлення залежно від того, в якому вигляді рекомендується їх використання. Відходи можуть бути в твердому або рідкому вигляді, залежно від способу прибирання приміщень. Деякі спеціалісти схильються до способу переробки відходів у твердому вигляді, що має недоліки пов'язані з необхідністю перемішування матеріалу, складністю безперервної його подачі у метантенк тощо [3].

Вважається за доцільне використовувати для оброблення сільськогосподарських відходів універсальну технологію, що застосовується для утилізації рідких відходів, тобто стічних вод підприємств харчової та мікробіологічної промисловості. Для цього потрібне деяке розбавлення твердих відходів, однак цей недолік перекивається перевагами, які дає безперервне бродіння рідких відходів, а

саме: забезпечення рівномірної швидкості потоку субстрату в бродильному апараті і стійкості процесу бродіння, покращення можливості регулювання умов ферментації, уникнення необхідності постійного перемішування, повна автоматизація процесу. Крім того, в комплексах, де для прибирання приміщень використовують гідрозмив, гнійова маса вже має рідкий стан і готова для ферментації.

Для вирішення проблеми ефективного очищення та утилізації стоків з високою концентрацією забруднень необхідно розробити комплексну технологію, що поєднує перевагу всіх відомих зараз способів. Основу такої технології має скласти метанова ферментація як попередня стадія очищення.

Дослідження процесу метанового збродження відходів свиноферм здійснювали на базі кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету харчових технологій (м. Київ, Україна).

Метановому бродінню піддавалися відходи тваринницьких комплексів з вологістю 96,1 %, 93,8 % та 91,12 %. Вміст сухих речовин в стоках складав 39,15 г/дм<sup>3</sup>, 61,92 г/дм<sup>3</sup> та 88,63 г/дм<sup>3</sup> відповідно. Процес проводився при температурі 45°C, що, з одного боку, забезпечує необхідну інтенсивність процесу ферментації порівняно з мезофільним режимом, а з іншого – потребує менших енерговитрат, порівнюючи з термофільним режимом.

Для дослідження періодичного процесу були вибрані дози завантаження, що відповідають 30 та 50 % від загального об'єму культуральної рідини. При кількості субстрату 30 % залежно від вологості процес тривав 5, 7 та 9 діб, а при 50 % – вий дозі – 7, 9 та 12 діб відповідно. Показано, що при збільшенні дози завантаження та зменшенні вологості субстрату, загальний об'єм утвореного біогазу зростає. Так, при проведенні процесу бродіння з субстратом вологістю 96,1 % та зміною дози завантаження з 30 % на 50 %, загальна кількість утвореного газу зростає на 38,7 %. Це є характерним і для процесів з вологістю 93,8 та 91,12 %, де при збільшенні дози завантаження кількість біогазу зростає на 35,6 та 35,4 % відповідно. Результати досліджень по біогазу та хімічному споживанню кисню (ХСК) культуральної рідини (КР) наведені в табл. 6.27, 6.28.

Таблиця 6.27

**Вплив вологості субстрату та дози завантаження на об'єм біогазу**

| Вологість субстрату, % | Доза завантаження, % | Об'єм біогазу дм <sup>3</sup> /дм <sup>3</sup> КР | Об'єм біогазу дм <sup>3</sup> /кг СР <sub>зав.</sub> <sup>1)</sup> | Об'єм біогазу дм <sup>3</sup> /кг СР <sub>збродж.</sub> <sup>2)</sup> |
|------------------------|----------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 96,10                  | 30                   | 3,210                                             | 273                                                                | 525                                                                   |
|                        | 50                   | 5,240                                             | 260                                                                | 578                                                                   |
| 93,80                  | 30                   | 5,202                                             | 280                                                                | 588                                                                   |
|                        | 50                   | 8,125                                             | 262                                                                | 629                                                                   |
| 91,12                  | 30                   | 7,521                                             | 283                                                                | 646                                                                   |
|                        | 50                   | 11,750                                            | 265                                                                | 694                                                                   |

<sup>1)</sup> СР<sub>зав.</sub> – сухої речовини завантаженої;

<sup>2)</sup> СР<sub>збродж.</sub> – сухої речовини збродженої

*Джерело: розрахунки авторів*

Одночасно показано (табл. 6.27), що питомий вихід біогазу на одиницю завантажених сухих речовин зменшується при збільшенні дози завантаження при однаковій вологості субстрату. Це свідчить про те, що підвищена кількість сухих речовин в культуральній рідині не дає змогу популяції мікроорганізмів здійснювати повну їх асиміляцію, що, в свою чергу, впливає на тривалість бродіння та підтверджується кінцевими значеннями ХСК (табл. 6.28).

## Вплив вологості субстрату та дози завантаження на показники бродіння

| Вологість субстрату, % | Доза завантаження, % | Вміст метану, % | pH кінцеве | ХСК кінцеве мг $O_2/дм^3$ | Ефективність очищення за ХСК, % |
|------------------------|----------------------|-----------------|------------|---------------------------|---------------------------------|
| 96,10                  | 30                   | 83,2            | 8          | 1047                      | 91,5                            |
|                        | 50                   | 80,1            | 8,2        | 1220                      | 90,3                            |
| 93,80                  | 30                   | 80,9            | 8          | 1480                      | 88,9                            |
|                        | 50                   | 74,5            | 8,2        | 1686                      | 87,4                            |
| 91,12                  | 30                   | 75,3            | 8,3        | 2445                      | 87,8                            |
|                        | 50                   | 68,4            | 8,5        | 2680                      | 86,2                            |

Джерело: розрахунки авторів

Для визначення максимальної активності популяції метаноутворюючих мікроорганізмів проводилося щоденне вимірювання ХСК, кількості утвореного біогазу, вмісту метану в ньому. Динаміка утворення біогазу та зниження ХСК при зброджуванні субстрату однієї з вологостей (93,8 %) представлена на рис. 6.21.

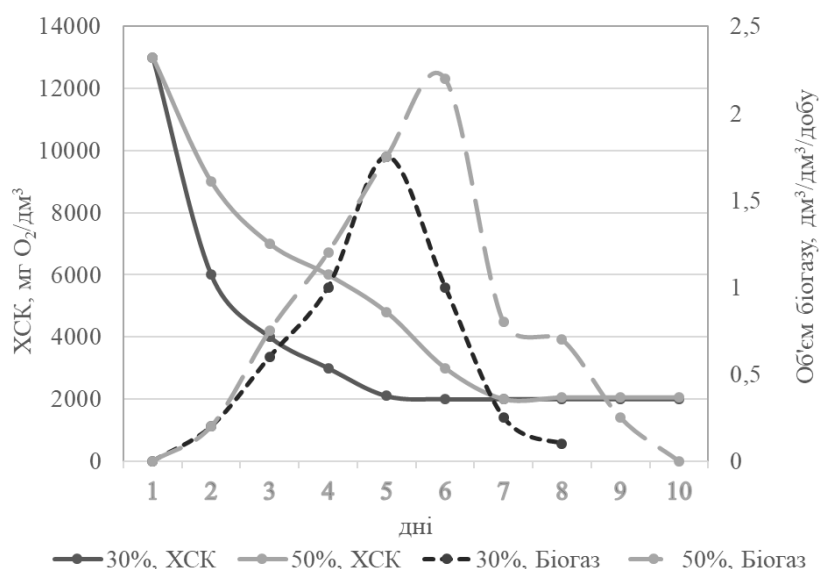


Рис. 6.21. Зміна об'єму біогазу та ХСК при вологості субстрату 93,8 %

Джерело: авторська розробка

Встановлено, що більші дози завантаження та концентрації сухих речовин субстрату негативно впливають на процеси метанотворення, що виявляється в зменшенні кількості метану в біогазі. Так, максимальна кількість метану в біогазі (83,2 %) була отримана при найбільшій вологості та дозі завантаження 30 %, а мінімальна (68,4 %) – при найменшій вологості та 50 % – вому завантаженні.

Дослідження процесів очищення показало, що збільшення концентрації сухих речовин у культуральній рідині веде до подовження тривалості адаптації культури, збільшення часу бродіння та зниження ефекту очищення (табл. 6.27, 6.28). Це, очевидно, пояснюється тим, що деякі компоненти субстрату проходять неповний шлях трансформації в гази, що спричинює їх накопичення в культуральній рідині. Також встановлено вплив концентрації субстрату та його дози на якісний та кількісний склад вітамінів кобаламінової групи. Виявлено, що при метановому бродінні стоків, кількість вітамінів зростає в порівнянні з початковими значеннями в 3,1 ... 6,6 рази. Результати досліджень вітамінного складу наведено в табл. 6.29.

Кількісний та якісний склад кобаламінів в культуральній рідині

| Вологість субстрату, % | Доза завантаження, % | Загальна кількість вітамінів, мкг/г СР | Абсолютний склад кобаламінів, мкг/г СР |                 |            | Відносний склад кобаламінів, % |                 |            |
|------------------------|----------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|------------|--------------------------------|-----------------|------------|
|                        |                      |                                        | фактор В                               | B <sub>12</sub> | фактор ІІІ | фактор В                       | B <sub>12</sub> | фактор ІІІ |
| 96,10                  | 30                   | 30,4                                   | 11,61                                  | 16,17           | 2,61       | 38,2                           | 53,2            | 8,6        |
|                        | 50                   | 36,7                                   | 11,89                                  | 17,40           | 7,41       | 32,4                           | 47,4            | 20,2       |
| 93,80                  | 30                   | 35,8                                   | 10,42                                  | 16,36           | 9,02       | 29,1                           | 45,7            | 25,2       |
|                        | 50                   | 43,4                                   | 10,63                                  | 17,92           | 14,84      | 24,5                           | 41,3            | 34,2       |
| 91,12                  | 30                   | 38,5                                   | 9,12                                   | 15,71           | 13,67      | 23,7                           | 40,8            | 35,5       |
|                        | 50                   | 47,6                                   | 9,42                                   | 18,33           | 19,85      | 19,8                           | 38,5            | 41,7       |

Доведено, що зростання загальної кількості вітамінів при зменшенні вологості субстрату та підвищенні дози завантаження іде, в основному, за рахунок накопичення активної форми вітаміну (фактор ІІІ), тоді як приріст неактивної форми (фактор В) та істинного вітаміну B<sub>12</sub> незначний. Найрезультативнішим в цьому плані є використання субстрату з вологістю 91 ... 94 %, при 50 %-вій дозі завантаження.

Для дослідженні безперервного режиму бродіння був використаний субстрат з такими ж вологостями, як і при періодичному. Дози завантаження складали 10, 12 та 15 %, що відповідає швидкостям розбавлення  $4,2 \cdot 10^{-3}$ ,  $5,0 \cdot 10^{-3}$  та  $6,3 \cdot 10^{-3}$  год<sup>-1</sup> відповідно. Для стимуляції процесу вітамінівотворення застосовувалась сіль кобальту (CoCl<sub>2</sub>) в концентрації 5 мкг/дм<sup>3</sup>. Це дало змогу виявити вплив кобальту не тільки на процес вітамінівотворення, а й на інші показники бродіння.

Встановлено, що кількість виділеного біогазу із об'єму культуральної рідини знаходиться у прямо пропорційній залежності з дозою завантаження, та в обернено пропорційній із вологістю субстрату (рис. 6.22).

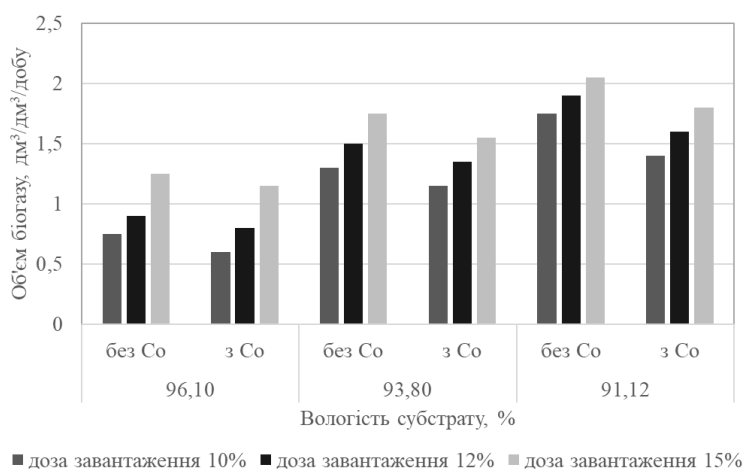


Рис. 6.22. Добовий вихід біогазу залежно від вологості субстрату, дози завантаження та солі Со

Джерело: розраховано авторами

Найменший вихід біогазу спостерігався при вологості субстрату 96,1 % та 10 %-ому завантаженні, а найбільший – при вологості 91,12 % та 15 %-му завантаженні. Але характерним є те, що при збільшенні дози завантаження та концентрації субстрату, величина приросту біогазу поступово зменшується. Це вказує на пригнічення процесу метаногенерації підвищеною кількістю поживних речовин субстрату, що не дає можливість популяції організмів активного мулу здійснювати повну трансформацію в біогаз. Ця ж думка має підтвердження при аналізі якісного складу біогазу, коли збільшення концентрації субстрату та дози завантаження приводить до зменшення вмісту метану в біогазі (табл. 6.30).

Істинний характер процесу метаногенерації можна виявити при розрахунках, що показують питому кількість синтезованого біогазу з одиниці завантаженої та зброженої сухої речовини субстрату.

В цьому випадку тенденція виходу біогазу буде дещо іншою, ніж на рис. 6.22.

Таблиця 6.30

## Показники процесу безперервного метанового бродіння при різних швидкостях розбавлення

| Вологість субстрату, % | Швидкість розбавлення, $D \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ | без Со                                                          |                                                                    |                                       |                          | з Со                                                            |                                                                    |                                       |                          |
|------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
|                        |                                                           | Об'єм біогазу, $\text{дм}^3/\text{кг}$ $\text{CP}_{\text{зав}}$ | Об'єм біогазу, $\text{дм}^3/\text{кг}$ $\text{CP}_{\text{збродж}}$ | Глибина збродження за $\text{CP}$ , % | Ефект очищення за ХСК, % | Об'єм біогазу, $\text{дм}^3/\text{кг}$ $\text{CP}_{\text{зав}}$ | Об'єм біогазу, $\text{дм}^3/\text{кг}$ $\text{CP}_{\text{збродж}}$ | Глибина збродження за $\text{CP}$ , % | Ефект очищення за ХСК, % |
| 96,10                  | 4,2                                                       | 202                                                             | 477                                                                | 42,3                                  | 88,82                    | 180                                                             | 477                                                                | 37,7                                  | 87,99                    |
|                        | 5,0                                                       | 204                                                             | 493                                                                | 41,4                                  | 87,84                    | 183                                                             | 512                                                                | 35,7                                  | 86,42                    |
|                        | 6,3                                                       | 215                                                             | 551                                                                | 39,1                                  | 86,76                    | 202                                                             | 601                                                                | 33,6                                  | 84,46                    |
| 93,80                  | 4,2                                                       | 220                                                             | 524                                                                | 42,1                                  | 83,09                    | 187                                                             | 525                                                                | 35,7                                  | 81,99                    |
|                        | 5,0                                                       | 210                                                             | 530                                                                | 39,6                                  | 82,19                    | 184                                                             | 555                                                                | 33,2                                  | 80,62                    |
|                        | 6,3                                                       | 193                                                             | 672                                                                | 28,7                                  | 80,82                    | 175                                                             | 732                                                                | 23,9                                  | 78,97                    |
| 91,12                  | 4,2                                                       | 197                                                             | 510                                                                | 38,7                                  | 81,09                    | 167                                                             | 513                                                                | 32,5                                  | 80,50                    |
|                        | 5,0                                                       | 186                                                             | 519                                                                | 35,9                                  | 80,21                    | 160                                                             | 537                                                                | 29,7                                  | 79,44                    |
|                        | 6,3                                                       | 156                                                             | 620                                                                | 25,2                                  | 78,74                    | 135                                                             | 658                                                                | 20,5                                  | 77,84                    |

Джерело: розраховано авторами

Як видно з результатів, представлених в табл. 6.30, кількість біогазу, що утворюється з одиниці завантаженої сухої речовини субстрату значною мірою залежить від концентрації завантаження та швидкості розбавлення. Максимальна продуктивність метану –  $220 \text{ дм}^3/\text{кг} \text{ CP}_{\text{зав}}$  була отримана при швидкості розбавлення  $4,2 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$  та дозі завантаження, що складає  $6,19 \text{ г} \text{ CP}/\text{дм}^3/\text{добу}$ . Після чого спостерігається зниження кількості синтезованого біогазу. Це вказує на те, що при використанні різних субстратів існує деякий поріг концентрації та доз завантаження, за яким ефективність метанового бродіння знижується, оскільки сам субстрат або продукти його неповного розкладу гальмують процес. У нашому випадку ріст продукції біогазу спостерігався тільки при вологості субстрату 96,1 %, а при менших – відбувається зниження.

Розрахунки питомої кількості біогазу на одиницю збродженого субстрату показали, що найкращі результати можуть бути одержані при ферментації субстратів різної вологості з максимальною швидкістю потоку. Найбільший вихід –  $672 \text{ дм}^3/\text{кг} \text{ CP}_{\text{збродж}}$  спостерігався при вологості субстрату 93,8 % з швидкістю розбавлення  $6,3 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ .

Досліди показали, що застосування солей кобальту з використаною концентрацією пригнічує процеси метаногенерації. Кількість газу при застосуванні солі кобальту зменшується на 11 ... 15,5 %, а вміст в ньому метану на 1,2 ... 1,8 %. Спостерігається чітка тенденція – чим більша концентрація субстрату, тим сильніше виявляється негативний вплив кобальту.

Показано, що зниження інтенсивності процесу очищення за ХСК має пряму залежність від вологості субстрату та обернену від швидкості розбавлення (табл. 6.30). Ефект очищення за ХСК за динамікою схожий на збродження субстрату за сухими речовинами. Тобто, чим більша концентрація субстрату і проток, тим менше популяція мікроорганізмів вилучає забруднень із культуральної рідини (рис. 6.23).

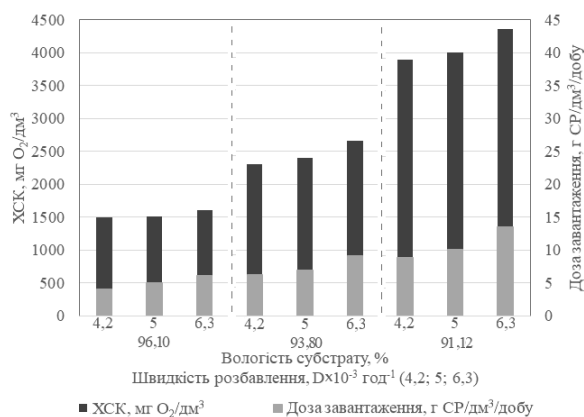


Рис. 6.23. Залежність ХСК культуральної рідини від дози завантаження та вологості субстрату

Джерело: розраховано авторами

Найкращий ефект очищення (88,82 %) було досягнуто при використанні субстрату з максимальною вологістю та найменшим протоком. Це свідчить про те, що для існуючої асоціації мікроорганізмів найсприятливіші умови для асиміляції забруднень складаються тоді, коли концентрація забруднень в культуральній рідині не дуже велика. Це, в свою чергу, впливає на інтенсивність масообмінних процесів, сприяє кращому перемішуванню культуральної рідини, що зумовлює більшу взаємодію мікроорганізмів з речовинами субстрату.

Застосування солей кобальту чинить на процеси очищення пригнічуючу дію. При цьому збільшення швидкості розбавлення веде до зменшення ефекту очищення в середньому на 3,6 ... 10,7 % залежно від вологості субстрату.

Одночасно з процесами очищення та газогенерації при метановому бродінні гнойових стоків утворюється значна кількість вітамінів. Особливу увагу привертають вітаміни ціанкобаламінової групи. При використанні біоавтографічного методу в зброженій культуральній рідині були зареєстровані такі форми вітамінів: В<sub>12</sub> та фактор III, що відносяться до активних форм, та неактивну – фактор В.

Визначення загальної кількості вітамінів показало, що при метановому бродінні можна отримувати культуральну рідину зі значним вмістом кобаламінів (табл. 6.31).

Таблиця 6.31

## Загальна кількість вітамінів зброженої культуральної рідини

| Вологість субстрату, % | Використання CoCl <sub>2</sub> | Вітаміни, мкг/г СР                                          |       |       |
|------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------|-------|
|                        |                                | Швидкість розбавлення $D \cdot 10^{-3}$ , год <sup>-1</sup> |       |       |
|                        |                                | 4,2                                                         | 5,0   | 6,3   |
| 96,10                  | без CoCl <sub>2</sub>          | 24,40                                                       | 22,53 | 21,22 |
|                        | з CoCl <sub>2</sub>            | 28,79                                                       | 26,39 | 23,94 |
| 93,80                  | без CoCl <sub>2</sub>          | 32,08                                                       | 30,95 | 24,72 |
|                        | з CoCl <sub>2</sub>            | 37,61                                                       | 36,09 | 28,48 |
| 91,12                  | без CoCl <sub>2</sub>          | 43,75                                                       | 42,37 | 33,65 |
|                        | з CoCl <sub>2</sub>            | 45,56                                                       | 44,03 | 34,49 |

Джерело: розраховано авторами

Їх вміст значною мірою залежить від характеристик субстрату та параметрів культивування і може коливатися в межах 21,2 ... 45,6 мкг/г СР. Доведено, що кількість вітамінів знаходиться в прямо пропорційній залежності від концентрації субстрату, а доза завантаження або швидкість розбавлення має обернено пропорційний вплив.

Характеристика субстрату та параметрів культивування мають значний вплив на якісний склад вітамінів кобаламінової групи. Дослідження показали, що кількість активних форм вітаміну є переважаючою та коливається в межах 19,6 ... 35,7 мкг/г СР. При збільшенні концентрації субстрату до середніх значень, кількість активних форм збільшується, але підвищення швидкості розбавлення негативно впливає на їх синтез, особливо на фактор III. Найкращі результати по співвідношенню активних та неактивних форм можна отримати при застосуванні субстрату з вологістю 93,8 % та швидкістю потоку, що відповідає 10 %-вій дозі завантаження.

Визначено, що використання кобальту в концентрації 5 мкг/дм<sup>3</sup> є доцільним тоді, коли метою ферментації є отримання вітамінів. В присутності солі кобальту загальна кількість вітамінів зростає на 2,4 ... 15 %. Але збільшення концентрації субстрату та швидкості потоку приводить до зниження позитивного впливу кобальту. Кобальт спричиняє стимуляцію синтезу таких форм кобаламінів, як фактор В (неактивна) та фактор III (активна), але при цьому дещо пригнічується синтез вітаміну В<sub>12</sub>, особливо при більшій концентрації субстрату.

Наступним етапом було розроблення технологічної схеми очищення та утилізації висококонцентрованих стічних вод. В основі схеми лежить збродження стоків в метантенку та їх подальша обробка (рис. 6.24). Для остаточного вилучення забруднень запропоновано двостадійний аеробний спосіб доочищення.

Оброблення стоків включає такі основні стадії: накопичення відходів в ємності 1; усереднення стоку в збірнику 2; подрібнення твердої фракції в подрібнювачі 3; нагрівання в теплообміннику 4; метанове збродження при постійній температурі у метантенку 5; розділення на фракції у центрифугі 9; зневоднення крупної фракції на барабанному вакуум-фільтрі 15 та висушування в апараті 14 з подальшою упаковкою для використання як органічне добриво; упарювання культуральної рідини в випарному апараті 10; залежно від виду готової продукції – сушіння в розпилювальній сушарці 11 та упаковка готової білково-вітамінної домішки в апараті 16, або змішування з зерновими висівками та висушування після екструдера 13 збагачених кормів в сушарці 14; упаковка готової продукції в апараті

16. Біогаз збирається у газгольдері 7 та використовується для обігрівання процесу, а його надлишок іде на виробництво електроенергії в газовому електрогенераторі 17. Доочищення стоків здійснюється в аеротенках за двоступеневою схемою з регенерацією активного мулу. Надлишковий мул використовується для виробництва добрив або зброджується у метантенку. Останнє дає змогу збільшити загальний вихід біогазу.

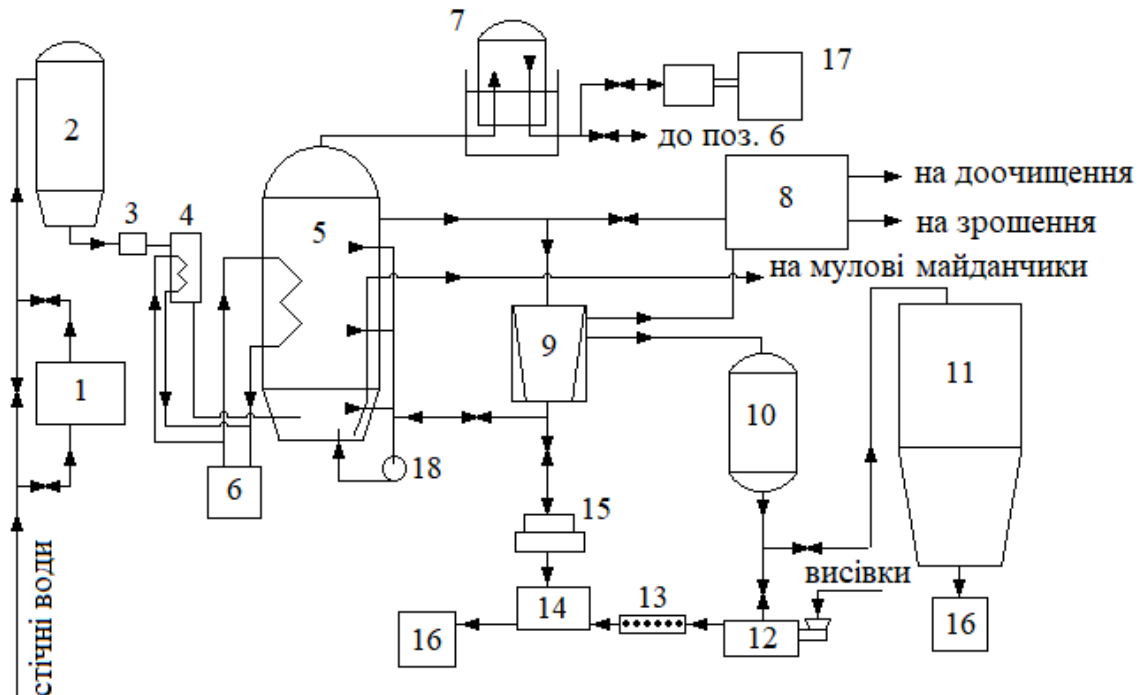


Рис. 6.24. Апаратурно-технологічна схема оброблення концентрованих стоків:

1 – накопичувач; 2 – збірник; 3 – подрібнювач; 4 – теплообмінник; 5 – метантенк; 6 – водогрійний котел; 7 – газгольдер; 8 – відстійник; 9 – центрифуга; 10 – випарний апарат; 11 – розпилювальна сушарка; 12 – змішувач; 13 – формувальний апарат; 14 – сушильний агрегат; 15 – барабанний вакуум – фільтр; 16 – фасувальний апарат; 17 – газовий електрогенератор; 18 – насос.

Джерело: авторська розробка

Для метанової ферментації стічних вод свиноферми на 3000 голів, при рекомендованих параметрах процесу, на самозабезпечення витрачається близько 51 % біогазу. Також встановлено, що глибина доочищення стічних вод в аеротенках становить 97,3 ... 98,4 %.

Отже, безперервну метанову ферментацію гнойових стоків необхідно застосовувати як першу стадію очищення, що дає можливість використовувати субстрати будь-якої концентрації. В результаті бродіння ефект очищення за ХСК становить близько 90 %. Чим більша концентрація субстрату та доза завантаження, тим менше значення цього показника. Кількість біогазу, який синтезується при бродінні, становить 0,8 ... 2,1  $\text{дм}^3/\text{дм}^3$  культуральної рідини. Збільшення швидкості потоку прямо пропорційно впливає на вихід газу, але приводить до зменшення в ньому метану та знижує глибину очищення. Метанова ферментація сприяє синтезу значної кількості вітамінів кобаламінової групи, більшість з яких є в активних формах. Змінюючи швидкість потоку та концентрація субстрату, є можливість регулювати вміст активних форм у суміші кобаламінів. Застосування  $\text{CoCl}_2$  в концентрації 5  $\text{мкг}/\text{дм}^3$  є доцільним, коли метою ферментації є одержання вітамінів, оскільки спостерігався регресивний вплив солей кобальту на процеси очищення та газогенерації.

Отже, використання метанової ферментації для утилізації висококонцентрованих гнойових стоків тваринницьких ферм належить до самоокупних, екологічно і економічно виправданих технологій. Адже, окрім практично повного вилучення забруднювальних речовин зі стічних вод, ця технологія дає можливість отримати альтернативне джерело енергії – біогаз, що є особливо актуальним в умовах необхідності забезпечення енергонезалежності України.

**Список використаної літератури**

1. Антонюк У. В. Державно-правовий механізм охорони навколишнього природного середовища в Україні і Польщі: порівняльний аналіз / У. В. Антонюк // Університетські наукові записки . – 2011. – № 4 (40). – С. 201 – 206.
2. Лисенко В. М. Аналіз процесів використання відходів АПК України в контексті сталого розвитку регіонів / В. М. Лисенко, В. В. Гімпель, В. М. Ніконорова // Вісник Сумського Національного аграрного університету, 2015. – Випуск 11 (27). – С. 60 – 63.
3. Левандовський Л. В. Природоохоронні технології та обладнання: підручник / Л. В. Левандовський, Н. О. Бублієнко, О. І. Семенова. – К.: НУХТ, 2013. – 243 с.