

6. Квітка С. О., Вовк О. Ю., Квітка О. С. Математична модель теплового стану асинхронного електродвигуна у нестационарних режимах. *Вісник ХНТУСГ*. 2016. Вип.175. С.140–142.
7. Квітка С. О., Вовк О. Ю., Квітка О. С. Теплова модель асинхронного електродвигуна в стаціонарних режимах. *Вісник ХНТУСГ*. 2015. Вип.164. С.118–120.
8. Квітка С. О., Вовк О. Ю., Квітка О. С. Пристрій контролю функціонального стану та захисту групи асинхронних електродвигунів від аварійних режимів роботи. *Вісник ХНТУСГ*. 2014. Вип.153. С. 85–87.
9. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Квітка О. С. Вплив відхилення напруги живлячої мережі на втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні. *Вісник ХНТУСГ*. 2015. Вип. 164. С.121–123.

УДК 662.767.2

БАГАТОШАРОВІ ЗАХИСНІ КОНСТРУКЦІЇ БІОГАЗОВИХ РЕАКТОРІВ

Скляр О. Г., к.т.н.,

Скляр Р. В., к.т.н.

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна

Анотація. У статті розглянуто сучасні підходи до проектування багатошарових захисних конструкцій біогазових реакторів, що визначають їхню довговічність, енергоефективність та відповідність європейським стандартам безпеки. Проаналізовано найбільш поширені типи конструкцій - сталеві, бетонні, композитні реактори та двомембранні газгольдери - з акцентом на їх багатошарових системах антикорозійного, теплоізоляційного та механічного захисту. Висвітлено вимоги нормативних документів VDI, DWA та EN щодо хімічної стійкості, газонепроникності, опору механічним навантаженням та тепловтратам. Показано, що застосування багатошарових систем значно знижує ризик корозійної деградації, підвищує стабільність ферментаційних процесів і продовжує строк служби реакторів на 15–40 років. Проведений аналіз доводить, що впровадження таких конструкцій є ключовою умовою ефективною та безпечною роботи біогазових комплексів, а також необхідним етапом інтеграції в європейський енергетичний простір. Запропоновані рекомендації можуть бути використані при проектуванні нових

установок та модернізації існуючих біогазових об'єктів.

Основна частина. Біогазові реактори функціонують у складних умовах, де поєднуються високі концентрації корозійно-активних компонентів (H_2S , органічні кислоти, аміак), постійна вологість, значні температурні коливання та механічні навантаження, пов'язані з перемішуванням і тиском газу [1]. Традиційні одношарові захисні покриття - полімерні або цементні - не забезпечують довготривалої стійкості, що призводить до прискореної корозії, деградації стінок реактора, тепловтрат та ризику утворення мікротріщин. У багатьох випадках такі пошкодження стають причиною аварійних зупинок ферментера, потрапляння газу в атмосферу, підвищення ризику займання та суттєвих економічних збитків.

Невідповідність конструкцій реакторів сучасним вимогам EN 16723, VDI 4630, DWA-A 791 та іншим європейським нормам ускладнює інтеграцію біогазових установок у європейський енергоринок. В умовах зміни клімату та зростання ролі відновлюваної енергетики постає нагальна потреба у вдосконаленні захисних багатошарових систем, які повинні забезпечити хімічну інертність, стійкість до газової дифузії, низьку теплопровідність, механічну міцність та довговічність конструкції. Це зумовлює необхідність аналізу сучасних підходів до проєктування багатошарових систем захисту реакторів, порівняння їх матеріалів та відповідності нормативним вимогам, що дозволить обґрунтувати оптимальні інженерні рішення для експлуатації біогазових комплексів у реальних умовах [2].

Біогазові реактори, виготовлені зі сталі, бетону або композитних матеріалів, потребують спеціальних систем багатошарового захисту. До таких систем належать: антикорозійні полімерні покриття, гідроізоляційні мембрани, багатошарові теплоізоляційні „сендвіч“-панелі, механічні бар'єри, а також газонепроникні еластичні оболонки для куполів. Кожен із цих шарів виконує свою функцію та підвищує загальну стійкість конструкції до навантажень, корозії, біологічної активності та тиску газу всередині реактора [3].

Одним із найбільш критичних факторів є захист внутрішньої поверхні ферментера. Високі концентрації H_2S , органічних кислот та вологість 95–100% прискорюють корозію металевих стінок. Тому сучасні реактори покривають епоксидними та поліуретановими шарами товщиною 600–1400 мкм, часто у кілька шарів, кожен з яких має різну твердість, гнучкість та хімічну стійкість. Така комбінація забезпечує високу адгезію, еластичність та довговічність покриття, а також витримує температуру ферментації 55 °C і вище.

Для бетонних реакторів застосовують полімерцементні або склопластикові вкладиші, які утворюють захисну оболонку, стійку до проникнення органічних кислот. Внутрішні полімерні бар'єри захищають не лише від корозії, але й від дифузії газів у бетон, що є

критично важливим для запобігання утворенню мікротріщин та деградації несучої здатності конструкції.

Багатошарові системи теплоізоляції відіграють ключову роль у стабільності ферментаційних процесів. Типова конструкція включає: внутрішній антикорозійний шар, шар базової гідроізоляції, мінераловатні або пінополіуретанові плити товщиною 80–200 мм, зовнішню металеву або композитну обшивку та шар захисту від ультрафіолету. Пінополіуретан має найнижчий коефіцієнт теплопровідності й забезпечує мінімальні тепловтрати, що особливо важливо для біогазових реакторів у холодному кліматі. Наявність декількох теплоізоляційних шарів стабілізує температуру всередині ферментера, зменшуючи витрати на підігрів на 20–35%.

Куполи та газгольдери біогазових установок також часто використовують багатошарові конструкції, які забезпечують газонепроникність та стійкість до ультрафіолету. Двомембранні системи складаються з внутрішньої мембрани, що утримує газ, та зовнішньої - що забезпечує механічний захист і формує надлишковий тиск. Між мембранами встановлюють вентилятори, що підтримують постійний тиск і забезпечують стабільність форми купола [4]. Полієфірні армовані ПВХ-мембрани з багатошаровою структурою забезпечують високу міцність, гнучкість і стійкість до температур $-30...+70$ °C.

Особливу увагу приділяють захисту зон, підданих високому навантаженню: патрубків, фланців, виходів мішалок і шахт для обслуговування. У цих зонах зазвичай застосовують багатошарові еластомерні накладки, армовані сталевую сіткою або склотканиною, що значно зменшує ризик прориву газу та руйнування конструкції [5].

У практиці експлуатації біогазових реакторів доведено, що багатошарові захисні системи продовжують термін служби обладнання на 15–25 років порівняно з одношаровими покриттями. Крім того, такі системи зменшують витрати на ремонт, втрати тепла, ризик пошкодження реактора та витоки біогазу [6,7]. Правильно підібрані матеріали захисту в комплексі з продуманою інженерною конструкцією дозволяють мінімізувати експлуатаційні ризики та забезпечити максимальну рентабельність біогазового виробництва.

Європейські виробники біогазових установок активно впроваджують багатошарові конструкції реакторів, які відповідають вимогам VDI 4630 (Fermentation of Organic Materials), DWA-A 791 (Construction of Biogas Plants), EN 12566, EN 16723, а також рекомендаціям German Biogas Association (FvB). Ці стандарти регламентують вимоги до матеріалів, захисних шарів, стійкості до газової дифузії, термічного захисту та експлуатаційної безпеки (таблиця 1).

Таблиця 1

Аналіз сучасних конструкцій біогазових реакторів за

європейськими стандартами

| Тип конструкції реактора / елемента | Типова багатощарова структура | Основні переваги | Основні недоліки | Оптимальна сфера застосування |
|--|--|--|--|---|
| Сталевий реактор з емалевим/епоксидним покриттям | Внутрішній шар – емаль / епоксид 600–1000 мкм; несучий шар – нержавіюча сталь 4–10 мм; теплоізоляція – мінеральна вата / ППУ 80–150 мм; зовнішня обшивка – сталь з УФ-захистом | Висока механічна міцність; добра хімічна стійкість; можливість швидкого монтажу; ремонтпридатність | Висока вартість матеріалів; чутливість до дефектів покриття; вимогливість до якості зварювання | Середні та великі біогазові станції; ферментери з підвищеним тиском газу та складними субстратами |
| Бетонний реактор з полімерним/композитним вкладишем | Несучий шар – армований бетон; внутрішній шар – ПЕ/ПП лайнер 1–3 мм або FRP-покриття; зовнішня гідроізоляційна утеплення (вата/ППУ) | Висока несуча здатність; можливість великих об'ємів (>5000 м ³); стійкість до механічних навантажень | Безвкладиша – ризик газової дифузії та мікротріщин; складний ремонт внутрішнього покриття | Великі стаціонарні ферментери, сховища дігестату; проекти з обмеженням по висоті, але по площі |
| Композитний реактор (GRP/FRP) | Внутрішній хімістійкий шар – вінілестерна смола; структурні | Повна корозійна стійкість; низька маса; низька теплопровідність | Висока вартість; специфіка ремонту; обмежені | Об'єкти з агресивними середовищами; регіони з |

| Тип конструкції реактора / елемента | Типова багат шарова структура | Основні переваги | Основні недоліки | Оптимальна сфера застосування |
|--|--|--|--|--|
| | Й шар – армований скловолокном композит (5–25 мм); зовнішній шар – захист від УФ і вологи | ніть; довгий термін служби (до 40+ років) | ня по габаритах при транспортуванні | високою вологістю та перепадами температури; преміум-сегмент біогазових станцій |
| Двомембранний газгольдер/купол | Внутрішня мембрана – газотримуюча ПВХ/ПЕ 1,2–2,4 мм; зовнішня – УФ-стійка армована мембрана 1,5–3 мм; міжмембранний простір – вентиляційна підтримка тиску | Висока газонепроникність; стійкість до вітрових і снігових навантажень; гнучкість, простота монтажу; можливість реконструкції | Потреба у постійному контролі тиску; старіння ПВХ під дією УФ без достатнього захисту; ризик механічних пошкоджень | Куполи ферментерів, окремі газгольдері; станції з потребою у змінному об'ємі газозберігання |
| Багат шарова теплоізоляційна система на стінках реактора | Внутрішній захисний шар емаль/епоксид гідроізоляція; теплоізоляція (ППУ/мінеральна вата 80–200 мм); | Значне зменшення тепловтрат ($U \leq 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$); стабільний температурний режим; скорочення витрат на підігрів на 25–40% | Збільшення товщини конструкції; додаткові витрати на якісний монтаж; потреба у | Усі типи реакторів, особливо в регіонах із холодним кліматом; установки мезо- й термофільного режиму |

| Тип конструкції реактора / елемента | Типова багатшарова структура | Основні переваги | Основні недоліки | Оптимальна сфера застосування |
|---|---|--|--|---|
| | паробар'єр; зовнішня металокомпозит-на обшивка з УФ-захистом | | контролі містків холоду | |
| Захисні вузли патрубків, люків, проходів мішалок | Локальні багатшарові накладки: еластомери + армування (сталева сітка /склотканина) герметики, фланцеві ущільнення | Зниження ризику витоків газу; захист найбільш навантажених зон; підвищення загальної безпеки | Потреба у регулярному огляді; локальна складність монтажу; вплив людського фактору | Зони проходу валів мішалок, люки обслуговування патрубків подачі/відбору середовища та газу |

Висновки. Аналіз сучасних конструкцій біогазових реакторів відповідно до європейських стандартів демонструє, що провідні країни ЄС застосовують комплексні багатшарові системи захисту, спрямовані на максимальну корозійну стійкість, газонепроникність і стабільність роботи реакторів у довгостроковому періоді. Стандарти VDI, DWA та EN визначають чіткі вимоги до матеріалів, методів антикорозійного захисту, теплоізоляції та механічної цілісності конструкцій, що дозволяє суттєво зменшити ризики корозійного руйнування, тепловтрат і дифузії газу. Порівняння різних типів реакторів (сталевих, бетонних, композитних) свідчить, що кожен має свої оптимальні умови застосування, але лише за умови використання багатшарових захисних рішень. Європейський підхід акцентує увагу на довговічності та мінімізації експлуатаційних ризиків, що забезпечує стабільність ферментаційних процесів і відповідність вимогам безпеки. Таким чином, модернізація конструкцій біогазових реакторів відповідно до європейських стандартів є необхідною умовою підвищення надійності, безпеки та енергоефективності біогазових комплексів.

Список використаних джерел.

1. Комар А. С., Акулов, В. Д. Технологічні аспекти оптимізації біогазових установок. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2025. Вип. 15(1). С. 129–135. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-15>
2. Комар А. С. Огляд методів дослідження та оптимізації машинних технологій утилізації відходів тваринництва. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т. 2. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-2-9>
3. Акулов В. Д. Шляхи підвищення енергетичної ефективності біогазової установки. *Праці ТДАТУ: наукове фахове видання*. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. Вип. 24, т. 2. С. 27–36. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-3>
4. Болтянський Б., Сиротюк С., Коробка С., Стукалець І. Аналіз методів удосконалення процесу переробки органічних відходів тваринництва у метантенках. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2024. Вип. 14(1). <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-6>
5. Скляр О. Г., Комар А. С. Теоретичні аспекти моделювання машинної технології утилізації органічних відходів. *Праці ТДАТУ: наукове фахове видання*. 2023. Вип. 23, т. 1. С. 104–114. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2023-23-1-104-115>
6. Болтянський Б. В. Аспекти вдосконалення технології виробництва біогазу. *Праці ТДАТУ*. 2024. Вип. 24, т. 1. С. 89–100. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-6>
7. Болтянський Б.В. Енерго- та ресурсозбереження в тваринництві: підручник / Б. В. Болтянський та ін. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2020. 410 с.

УДК 620.92**ШЛЯХИ ПОДОЛАННЯ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ АПК**Болтянський Б. В.¹, к.т.н.,Сиротюк С. В.², к.т.н.,Болтянський О. Б.¹, асист.¹*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна*²*Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Гжицького, м. Дубляни, Україна*

Постановка проблеми. Аграрний сектор України виявив високу стійкість та адаптивність до ризиків воєнного часу – продовольчі