

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 проєктування 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 проєктуванні 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 багат шарових 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 багат шарового захисту. До таких систем належать: антикорозійні полімерні покриття, гідроізоляційні мембрани, багат шарові 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.

Багат шарові 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 багат шарові 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]. Поліефірні армовані ПВХ-мембрани з багатошаровою структурою забезпечують високу міцність, гнучкість і стійкість до температур $-30...+70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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 багатошарова 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	Вища 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	Висока несуча здатність; можливість великих об'ємів (>5000 м³);	Без вкладиша – ризик газової дифузії та	Великі стаціонарні ферментери, сховища дігестату;

Тип конструкції реактора / елемента	Типова багатошарова структура	Основні переваги	Основні недоліки	Оптимальна сфера застосування
	1–3 мм або FRP-покриття; зовні – гідроізоляція й утеплення (вата/ППУ)	стійкість до механічних навантажень	мікротріщин; складніший ремонт внутрішнього покриття	проекти з обмеженням по висоті, але не по площі
Композитний реактор (GRP/FRP)	Внутрішній хімістійкий шар – вінілестерна смола; структурний шар – армований скловолокном композит (5–25 мм); зовнішній шар – захист від УФ і вологи	Повна корозійна стійкість; низька маса; низька теплопровідність; довгий термін служби (до 40+ років)	Висока вартість; специфіка ремонту; обмеження по габаритах при транспортуванні	Об'єкти з агресивними середовищами; регіони з високою вологістю та перепадами температур; 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 – вентильовання й 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 газгольдери; станції з потребою у змінному об'ємі газозберігання
Багатошарова теплоізоляційна система на стінках реактора	Внутрішній захисний шар емаль/епоксид гідроізоляція; теплоізоляція (ППУ/мінеральна вата 80–200 мм); паробар'єр; зовнішня металокомпозитна обшивка з УФ-захистом	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 контролі містків холоду	Усі типи реакторів, особливо в регіонах із холодним кліматом; установки мезо- й термофільного режиму
Захисні вузли патрубків, люків, проходів мішалок	Локальні багатошарові 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 проходів 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 багатошарові 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 багатошарових 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*. 15(1). 2025. 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. DOI: 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, 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*. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 1. С. 104–114. DOI: 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. К.: Видавничий дім «Кондор», 2020. 410 с.