

УДК 536.24:631.371

С. Й. Ткаченко, д. т. н., проф.;

Н. В. Пішеніна, асп.;

Т. Ю. Румянцева, студ.

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ЗНИЖЕННЯ МАТЕРІАЛОМІСТКОСТІ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

Проаналізовано технологічні та конструктивні рішення відомих діючих біогазових установок з позицій їх матеріаломісткості та продуктивності. Запропоновано методи та засоби зниження матеріаломісткості біогазової установки для підвищення енергоефективності систем біоконверсії.

Вступ та постановка задачі

Більшість сучасних екологічних проблем виникає через локальне нагромадження органічних відходів, кількість яких дуже велика для природного потенціалу біодеградації. Такі відходи мають підлягати утилізації. Одним із шляхів утилізації відходів є біогазова технологія, яка дає змогу разом із вирішенням екологічної проблеми отримувати високоефективні органічні добрива та енергію у вигляді біогазу.

Основними елементами, що складають біотехнологічні процеси, є: біологічний агент, субстрат, біотехнологічне обладнання і продукт (біогаз, добриво, зокрема вітаміни групи В).

Технічне оснащення біотехнології базується на загальних положеннях технічної біохімії і харчової технології, проте має свою специфіку. Принципові відмінності біотехнологічних процесів від суто хімічних зумовлені [1]:

- чутливістю біологічних агентів до фізико-механічних дій;
- наявністю міжфазового перенесення речовин (за типом «рідина – клітини», «газ – рідина – клітини»);
- вимогами умов асептики;
- низькими швидкостями перебігу багатьох процесів в цілому;
- нестабільністю цільових продуктів;
- піноутворенням;
- складністю механізмів регуляції зростання і біосинтезу.

Під час розрахунків енергоефективності системи та техногенного навантаження на навколишнє середовище важливим фактором є матеріаломісткість установки. Матеріаломісткість біогазової установки (БГУ) — це відношення маси матеріалів установки до кількості виробленого біогазу за добу. Біореактор БГУ складає 75—80 % всієї маси металу установки.

Аналізуючи технологічні й технічні рішення сучасних біогазових установок за кордоном, можна відмітити такі основні тенденції їх розвитку [2]:

- спрощення конструкцій прифермських біогазових установок і компонування серійним обладнанням (використання стандартних суцільних або збірних металевих резервуарів, насосів-подрібнювачів, пропелерних мішалок);
- виготовлення резервуарів різного призначення, що входять до складу біогазових установок, у тому числі й біореакторів, зі збірних елементів, виготовлених із листового металу з високоякісним антикорозійним покриттям;
- зменшення частки біореакторів горизонтального типу в загальній кількості розроблених і збудованих біогазових установок.

Мета досліджень — визначення методів та засобів зниження матеріаломісткості БГУ для під-

вищення енергоефективності системи біоконверсії, зменшення її техногенного навантаження на навколишнє середовище.

Основні дослідження

Для реакторів БГУ в основному використовуються резервуари, промислові резервуари для технологічних процесів зберігання, транспортування й переробки різних рідин і твердих сипких матеріалів, виготовлені з вуглецевої сталі звичайної якості об'ємом від 5 м³ згідно з ТП і ВБН 2.2-58.2-94, ТУ 78 України 260.001-93. Конструкційно враховується горизонтальне або вертикальне розташування резервуара із кріпленням на стаціонарному або мобільному каркасі; односекційне, двосекційне та багатосекційне виконання. Стінки відповідно до технології використання (умов експлуатації) можуть бути виготовлені із двох і більше шарів металу, передбачаючи наявність утеплювача, ізоляції або водяного контуру у металоконструкції резервуара. Резервуари комплектуються запобіжними, зворотними та відсічними клапанами, рівнемірами, дренажними лініями, запірною арматурою, обвідними лініями, лініями завантаження—вивантаження і аварійного випорожнення апарата, рамою нагнітального блоку та блоком автоматики [3].

Питому металомісткість реактора в залежності від його призначення, конструктивного виконання, організації біохімічного процесу, схеми біогазової установки в загальному випадку можна описати рівнянням

$$m = f(q, \phi, \delta, n); \quad (1)$$

$$m = \frac{M_p}{V_6} = \frac{(0,5 + \phi)}{\phi} \cdot \frac{4n\delta\rho}{D_p q}, \quad (2)$$

де $q = V_6/V_p$ — показник інтенсивності процесу метанового зброджування, м³/(м³/добу); V_6 — вихід біогазу з 1 м³ реактора за добу, м³/добу; V_p — об'єм реактора, м³; $\delta = f(D_p)$ — товщина стінки резервуара реактора, яка повинна бути не менша ніж $(D_p/1000 + 2,5)$ [4], м; n — кількість реакторів; $\phi = H/D_p$ — співвідношення висоти до діаметра резервуара реактора.

Інтенсивність процесу метанового бродиння (швидкість організації процесу) q характеризується кількістю продукту, що отримується на одиницю об'єму біореактора в одиницю часу і значно залежить від факторів, що впливають на перебіг біохімічних процесів в реакторі [1, 5, 6, 7]:

$$q = \frac{V_6}{V_p} = f(t, F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7), \quad (3)$$

де t — робоча температура процесу; $F_1 \dots F_7$ — групи факторів: $F_1 = f(s, C/N, pH, L, b_1, b_2, V, X, B)$ — властивості сировини, де s — склад сировини, C/N — співвідношення вуглецю і азоту; pH — водневий показник; L — лужність суміші; b_1 — концентрація сировини (вміст сухих речовин); b_2 — концентрація твердих часток в сировині; V — вміст кислот; X — розмір твердих часток в сировині; B — приріст біологічного агента (бактерій); F_2 — наявність інгібіторів процесу; $F_3 = f(R, Z, P, I, \tau, v)$ — технологічні фактори, де R — режим завантаження реактора; Z — добова заміна середовища; P — спосіб перемішування; I — інтенсивність перемішування; τ — час зброджування; v — швидкість потоку; F_4 — вид технологічної схеми БГУ; F_5 — форма і геометричні параметри реактора, кількість реакторів; F_6 — спосіб термостабілізації, вторинне використання теплоти; F_7 — кліматичні умови регіону.

Проектуючи обладнання біогазової установки, необхідно розглядати можливість врахування всіх факторів в комплексі, тому що вони взаємопов'язані між собою, впливають один на одного і зумовлюють загальну продуктивність процесу і енергоефективність системи переробки відходів.

Мінімізувати об'єм реактора і, відповідно, питому металомісткість, можна за умови

$$V_p = \frac{V_6}{q_{\max}}, \quad (4)$$

де q_{\max} — максимально можлива інтенсивність процесу зброджування в реакторі біогазової установки для цих умов.

Авторами було проаналізовано 55 існуючих дієздатних біогазових установок, які споруджені в Україні, Росії, Молдові, Латвії, Білорусії, Німеччині, Чехії, Угорщині, Данії, Англії, США, Швеції, Франції, Італії, Японії, Китаї [2, 8 — 17]. В результаті виявлено, що q змінюється в межах від 0,15 до $4 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \text{добу})$. Очевидно, чим нижча інтенсивність біохімічних процесів, тим більший об'єм реактора, і навпаки. Розрахункова залежність об'єму реактора від виходу біогазу для різних значень q зображена на рис. 1.

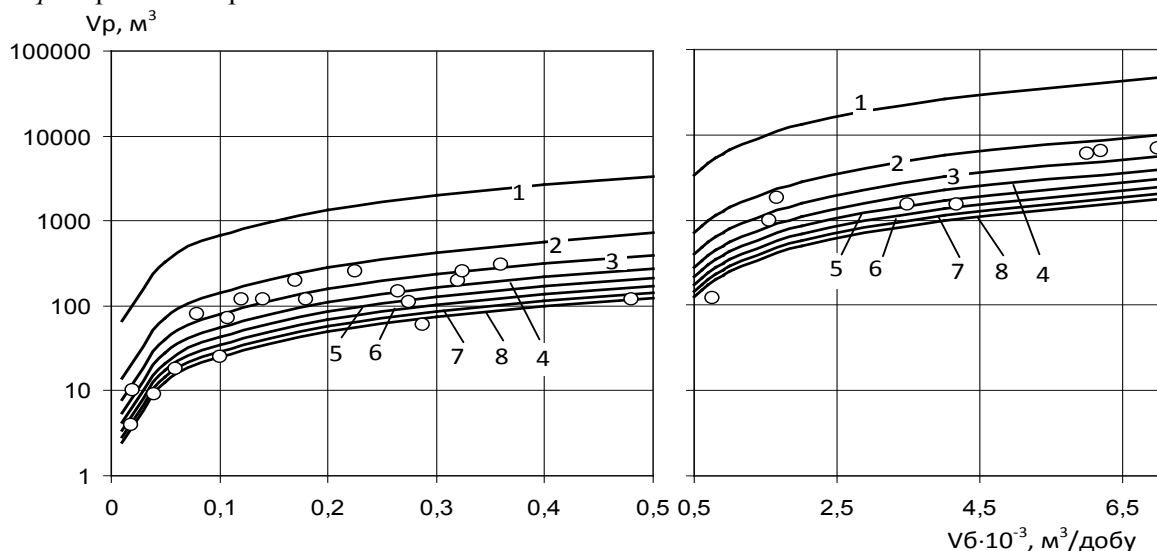


Рис. 1. Залежність об'єму реактора від виходу біогазу:

1 — $q = 0,15$; 2 — $q = 0,7$; 3 — $q = 1,25$; 4 — $q = 1,8$; 5 — $q = 2,35$; 6 — $q = 2,9$; 7 — $q = 3,45$; 8 — $q = 4,0$

На графіку відмічено точками результати порівняльного аналізу існуючих біогазових установок. Виходячи з рис. 1, можна зробити висновок, що в основному реактори біогазових установок проектується об'ємом до 1000 м^3 , а інтенсивність біохімічного процесу цих установок переважно знаходиться в межах від 0,8 до 2 і незначна кількість установок працюють, коли $4 \geq q \geq 6$ (точки, розташовані нижче кривої 8).

Наступним параметром, що впливає на зменшення металомісткості реактора біогазової установки, є геометричний параметр співвідношення висоти до діаметра ϕ .

Врахування ϕ дозволяє отримати мінімальний раціональний об'єм і форму резервуару для реактора з позицій маси M_p (металоємності m) і площі поверхні F (2), що, в свою чергу, зумовлює величину тепловтрат і впливає на тип і конструкцію системи термостабілізації, а також на спосіб та конструкцію пристроїв перемішування. Крім того, мінімальна площа поверхні біореактора зменшує вартість його спорудження.

Розрахункові залежності, що показують, як впливає ϕ на m і F , показані на рис. 2, 3. Дослідження проводились для металевих циліндричних резервуарів вертикального типу місткістю $V_p = 10 \dots 5000 \text{ м}^3$. При цьому для спрощень порівняння вважаємо, що в середньому $q = 1$, тобто для кліматичних умов України коефіцієнт виходу біогазу з 1 м^3 реактора за добу дорівнює одиниці. У розрахунках середня товщина стінки δ бралася 6 мм.

Одночасно проведено аналіз стандартних резервуарів вертикального виконання, що виготовляються на підприємствах Росії, України. В результаті виявлено, що резервуари місткістю до 1000 м^3 виготовляються із співвідношенням ϕ в межах від 0,9 до 1,2. Резервуари місткістю від 10000 до 30000 м^3 виготовляються з ϕ від 0,35 до 0,6.

На поданих залежностях (рис. 2, 3) точками відмічено результат аналізу геометричних даних і маси стандартних резервуарів, які використовуються для реакторів біогазових установок.

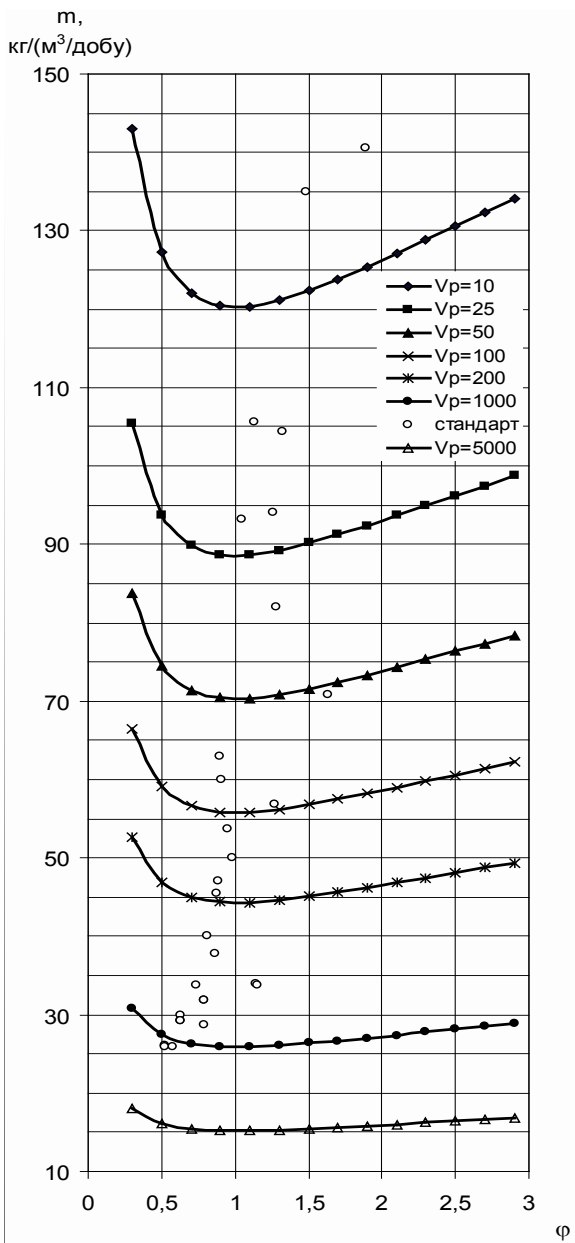


Рис. 2. Залежність питомої металомісткості реактора m від співвідношення $\phi = H/D$

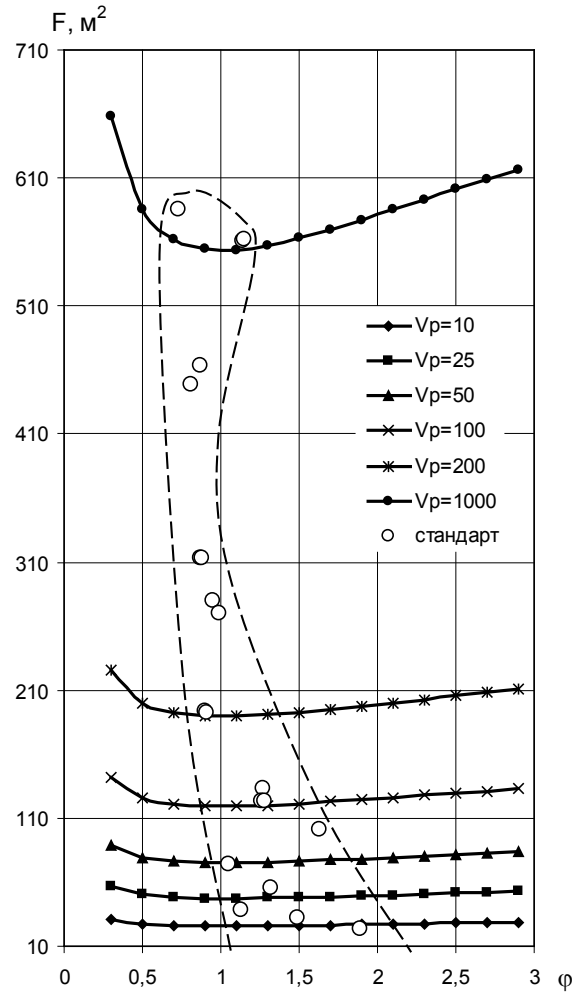


Рис. 3. Залежність площі поверхні реактора F від співвідношення $\phi = H/D$

Із рис. 2 та 3 випливає, що мінімальне значення питомої металомісткості m для V_p до 100 м^3 і мінімальне значення площі поверхні резервуара спостерігається при $\phi = 0,8 \dots 1,1$, що підтверджується реальними даними.

Реактори, V_p яких більше 100 м^3 , можна проектувати зі значеннями $\phi = 0,8 \dots 1,5$, виходячи з позицій малої питомої металоємності, але за таких ϕ зростає значення площі поверхні реактора.

На рис. 3 видно виродження чітко вираженого мінімуму F .

Загальний об'єм реактора установки може складатись із об'ємів декількох резервуарів. Відповідно, F залежить від параметрів, що враховують не тільки геометрію, а і структуру реактора установки:

$$F = f(V_p, n, \phi), \tag{5}$$

де n — кількість однотипних резервуарів реактора. Із графіків на рис. 1, 2 бачимо, що для мінімі-

зації m і F $\phi_{\text{опт}} = 0,9; 1; 1,1$. Використовуючи $\phi_{\text{опт}}$, досліджуємо, як змінюється $F = f(V_p, n)$.

Відомо [1], що здійснюючи просторовий поділ процесу зброджування, тобто застосовуючи реактор, що складається із $n \geq 2$ резервуарів, є можливість інтенсифікувати процес — q в 2...3 рази. Це відбувається завдяки тому, що у такій системі можна незалежно варіювати умови ферментації (швидкість потоку, pH , температуру) у кожному резервуарі з урахуванням створення оптимальних умов для розвитку мікроорганізмів. Наприклад, дослідження, проведені екологами [5], показали, що за термофільного метанового зброджування патокової барди спиртового виробництва зі вмістом сухих речовин СР 4,2 % для добової заміни 10 % середовища із 1 об'єму ферментаційної рідини виділяється 22 об'єми газу.

На рис. 4 показано залежність загальної площі поверхні реактора та металомісткості від кількості однотипних реакторів. Розраховуючи металомісткості, вважаємо, що інтенсивність процесу, на відміну від попередніх розрахунків (див. рис. 2), збільшилась втричі, тобто $q = 3$. Штриховими лініями позначено зміну металомісткості в разі $q = 22$ [5].

Із рис. 4 видно, що загальна площа збільшується на 50...70 %, а металомісткість, з урахуванням q , змінюється за іншим законом.

Залежності, показані на рис. 4, мають оціночний характер, тому що на даний час достатньо не досліджено закон зміни ефективності процесу зброджування зі збільшенням секцій реактора.

Для монтажу, експлуатації і обслуговування резервуарів від 100 м^3 необхідне допоміжне обладнання, комплектувальні конструкції, лази, люки, сходові конструкції, напрямні, каркаси тощо. Маса металу всього допоміжного обладнання і каркасів складає від 6 до 48 % від маси металу самого резервуара в залежності від об'єму резервуара і співвідношення ϕ . Зі збільшенням висоти і зменшенням діаметра резервуара виникає необхідність у влаштуванні додаткових поясів жорсткості або каркасів для зміцнення опору стінок резервуара вітровому навантаженню і підвищенню стійкості до руйнування. Під час експлуатації резервуара для запобігання утворенню тріщин в місцях великої концентрації напружень (вертикальні стики рулонованих стінок, стики стінки з днищем тощо) використовують додаткові накладки. Це призводить до збільшення металоемності конструкції резервуарів, які використовуються для біореактора [18—20].

На рис. 5 показано оціночні розрахункові залежності маси металу допоміжного обладнання $M_{\text{до}}$ у відсотках від маси резервуара, від ємності резервуара V_p . Для розрахунку були використані дані з технічною документацією резервуарів, які виготовляються на виробництвах України, та Росії [3, 18, 21, 22].

З рис. 5 випливає, що мінімальне значення маси допоміжного обладнання спостерігається для резервуарів з об'ємом від 600 до 800 м^3 . При цьому співвідношення ϕ складає 0,9...1,1.

Від швидкості організації процесу метанового бродіння q залежить величина об'єму реактора, що впливає на металомісткість біогазової установки. З дотриманням оптимальних умов перебігу реак-

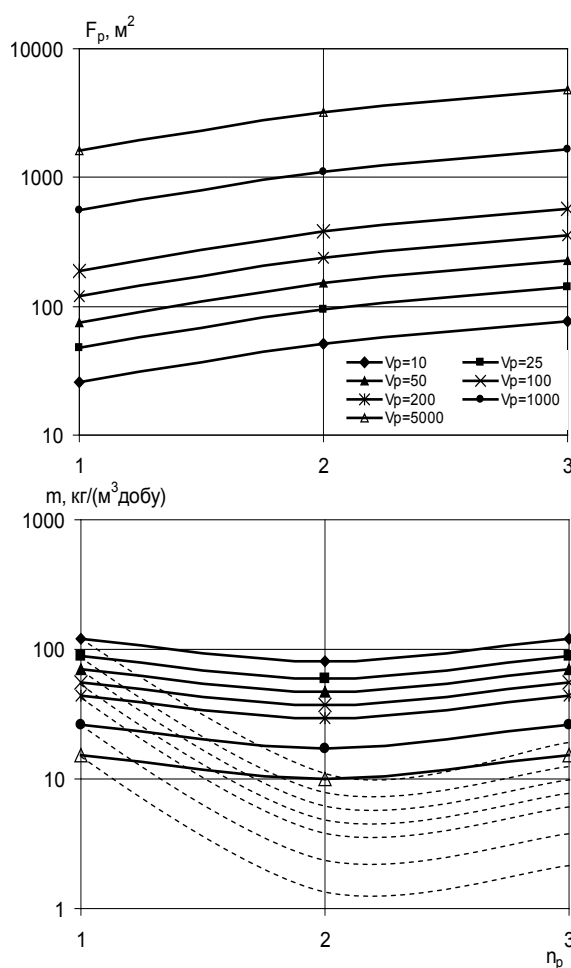


Рис. 4. Залежність площі поверхні резервуару реактора та металомісткості від кількості однотипних реакторів

ції є можливість підвищити значення q , відповідно зменшити V_p і металомісткість реактора — з одного боку. З іншого боку — вибравши відповідні конструктивні параметри резервуара реактора для оптимального співвідношення ϕ , значення n , є можливість зменшення металомісткості і матеріаломісткості реактора біогазової установки.

Можна також зазначити, що серед 55 проаналізованих 50 % біогазових установок мають реактори вертикального виконання переважно з ϕ від 0,7 до 1,4, 42 % установок споруджені з реакторами горизонтального виконання, 8 % — зі сферичними реакторами. Щодо призначення: 21 % — господарські, 7 % установок призначені тільки для утилізації відходів і отримання добрив.

Відносно впливу параметрів перебігу біохімічних процесів на інтенсивність метанового бродіння можна сказати, що 40 % з проаналізованих установок працюють з дотриманням температурного режиму 33...37 °С, при цьому значення q складає 0,9...2, термін зброджування в цих установках 10...17 діб, перемішування механічне або поєднання механічного і перемішування біогазом.

Максимальне значення q , що дорівнює 4...6 (МБУ-6, АП «КТИСМ», Україна; БіоЕн-1, Білорусь; ИБГУ-1, Росія; НИПКИ «Молния», Україна), отримано за умови робочої температури 40...53 °С, термін зброджування 5...10 діб. В цих установках реактор вертикального виконання обладнаний механічними мішалками з подрібненням кірки, режим роботи безперервний. Із них тільки установка БіоЕн-1 має можливість розділення фракцій відпрацьованої маси і повернення її в технологію, також здійснюється просторовий поділ процесу зброджування — працюють паралельно два реактори, що значно збільшує продуктивність установки [1, 5].

Встановлено також, що незначний відсоток конструкцій установок (2 %) передбачає здійснення утилізації теплоти відпрацьованої суміші, яка направляється в основному на попередній підігрів завантаженої сировини, за допомогою теплообмінників — рекуператорів, але при цьому величина q знаходиться в межах 1...1,5.

Висновки

1. Широке впровадження біогазових установок гальмується їх значною матеріаломісткістю. Енергоефективність системи біоконверсії, її техногенне навантаження на навколишнє середовище, в основному, визначається її матеріаломісткістю, яка, в свою чергу, залежить від властивостей органічних відходів і субстрату і визначається організацією та інтенсивністю біотехнологічних процесів, складом обладнання, топологією, раціональністю конструкторського виконання обладнання біогазової установки.

2. Об'єм реактора — V_p за заданої видатності по біогазу залежить від інтенсивності процесу метанового бродіння (швидкість організації процесу) q .

3. Після визначення раціонального об'єму реактора БГУ V_p потрібна конструкторська проробка зі знаходження зони мінімальних значень його масомісткості та площі поверхні M_{\min} , F_{\min} . В результаті аналізу отримано залежність для оцінки питомої металомісткості m реактора. Основними факторами, що впливають на величину m , є об'єм реактора, співвідношення висоти резервуара реактора до діаметра $\phi = H/D$, q та маси допоміжного обладнання, яка залежить від об'єму реактора. Дослідження показали, що з позицій питомої металомісткості та тепловтрат найоптимальнішою буде конструкція реакторів біогазових установок зі співвідношенням ϕ від 0,9 до 1,1.

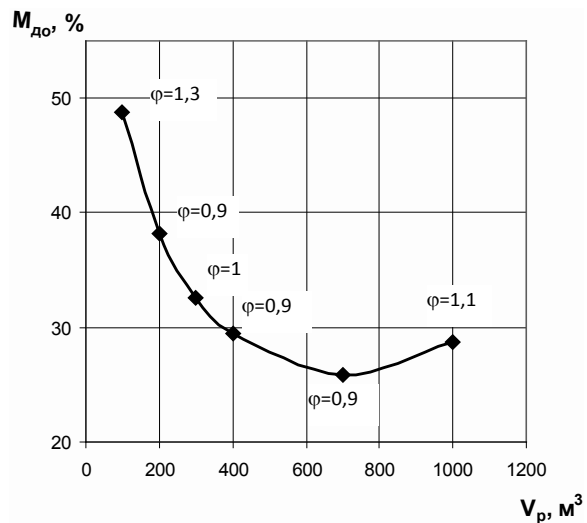


Рис. 5. Залежність маси металу конструкцій допоміжного обладнання $M_{до}$ у відсотках від маси резервуара, від ємності резервуара V_p для V_p від 100 до 1000 м³

4. Незначна кількість схемних рішень установок містить елементи теплоутилізації, просторового поділу процесу (декілька реакторів), розділення на фракції відпрацьованої суміші з подальшим поверненням рідкої фази в технологію. Це пояснюється високою вартістю такого устаткування, а також недостатнім дослідженням фізичних параметрів робочих сумішей біогазових установок, що ускладнює проектування нового ефективнішого теплотехнологічного обладнання. Крім того, додаткове обладнання збільшує матеріаломісткість установок. У зв'язку з цим необхідно дослідити доцільність застосування додаткового обладнання з точки зору зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище та збільшення показника швидкості організації процесу q .

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Волова Т. Г. Биотехнология / Т. Г. Волова. — Новосибирск : изд-во Сибирского отделения Российской Академии наук, 1999. — 252 с.
2. Світові тенденції розвитку біогазових установок [Електронний ресурс] // Електронний журнал «Пропозиція». — 2001. — № 12. — Режим доступу до журн. : <http://www.propozitsiya.com>.
3. Интернет-магазин. Прайс-лист. [Електронний ресурс] — Режим доступу : <http://www.sbk.uaprom.net>.
4. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа, частина 1—3 : ВБН В.2.2-58.2-94.
5. Мосин О. В. Экологические аспекты современной биотехнологии [Електронний ресурс] / О. В. Мосин. — Режим доступу : <http://www.allbest.ru>.
6. Семенов И. В. Проектирование биогазовых установок / И. В. Семенов. — Сумы : ПФ «МакДен», ИПП «Мрия-1» ЛТД, 1996. — 347с.
7. Веденев А. Г. ОФ «Флюид» Биогазовые технологии в Кыргызской республике / А. Г. Веденев, Т. А. Веденева. — Б. Типография «ЕВРО», 2006. — 90с.
8. Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки : моног. / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. — Вінниця : Універсум-Вінниця, 2004. — 132 с.
9. Анаэробная переработка стоков ферм на биогазовых установках [Електронний ресурс] / [Н. П. Ледин, В. Н. Синчурин, С. И. Кононенко, И. Н. Ледин] — Режим доступу : http://agrovyg.ru/page/list_item/id-2361/
10. Оцінка енергетичної ефективності біогазової установки / [С. Й. Ткаченко, Є. П. Ларюшкін, Г. О. Нудель, В. С. Тагроня] // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 1998. — № 2. — С. 48—55.
11. А. с. №1833422. Установка для метанового сбраживания биомассы / Якушко С. И. и др. 1993 ; опубл. Бюл. № 29,
12. Якушко С. И. Выбор технологических режимов в установках для производства биогаза / С. И. Якушко // Вісник СумДУ. — 2006 — № 5(89) — С. 102—108.
13. Фонд розвитку громадських організацій «західноукраїнський ресурсний центр» [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.zurc.org>.
14. Створення дослідно-промислової біогазової установки «Екогаз» [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://agroexpo.net/technol>.
15. Проект по установке газгольдеров для сбора биогаза [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://krimkonsalting.at.ua/blog/2009-06-19-28>.
16. Родина Е. М. Использование эмиссий метана из отходов для получения биогаза [Електронний ресурс] / Е. М. Родина, Ш. А. Ильясов, З. А. Абайханова // Вестник КРСУ — 2003 — № 6. — Режим доступу : <http://http://krsu.edu.kg>.
17. Экодом, альтернативная энергетика [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.akclub.narod.ru>.
18. Резервуары стальные, изготовитель ЗАО «Самарский завод КВОиТ» [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.kvoit.samara.ru>
19. Горев В. В. Металлические конструкции, т. 3 / В. В. Горев. — М. : Высшая школа, 2002. — 541 с.
20. Стоянов В. В. Проблемы обеспечения несущей способности строительных металлических конструкций в полном объеме срока эксплуатации / В. В. Стоянов // В сб. VII Украинской НТК «металлические конструкции». — К. : Сталь. — С. 286—292
21. Чертежи вертикальных резервуаров, изготовитель г. Санкт-Петербург ЗАО «ТК 122 ЭМЗ» [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.metalbak.ru>.
22. Технічні характеристики резервуарів, Запорізький завод металевих конструкцій [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.zmkzp.com.ua>

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Надійшла до редакції 2.07.10
Рекомендована до друку 7.09.10

Ткаченко Станіслав Йосипович — завідувач кафедри, **Пішеніна Надія Володимирівна** — аспірантка.

Кафедра теплоенергетики;

Румянцева Тетяна Юрївна — студентка Інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Вінницький національний технічний університет