

ТЕПЛООБМІН І ГІДРОДИНАМІКА ПРИ СТВОРЕННІ ЛОКАЛЬНОГО НЕРІВНОМІРНОГО ГАЗОРІДИННОГО СЕРЕДОВИЩА БІЛЯ ТЕПЛООБМІННОЇ ПОВЕРХНІ

Д.т.н., проф. Ткаченко С.Й., асп. Степанов Д.В.

Як відомо в реакторі біогазової установки (БГУ) відбувається процес зброджування органічних речовин з отриманням біогазу, що піднімається з товщі субстрату, утворюючи газорідинне середовище. Термостабілізація реактора вимагає підводу теплової енергії в робочий об'єм [1]. Переважно для цього використовують вбудовані підігрівники. При цьому в реакторі відбувається тепловіддача від теплообмінної поверхні до газорідинного середовища.

Дослідженнями зовнішнього теплообміну між твердою поверхнею і газорідинним середовищем займалися автори [2, 3 та ін.]. Їх роботи стосуються процесів в колонних апаратах хімічної технології. При проведенні досліджень автори [2, 3] виключали вплив міжфазного переносу між газом та рідиною. Це наближує експеримент до умов роботи реактора БГУ.

На основі попередніх розрахунків в реакторі об'ємом $2 \dots 100 \text{ м}^3$ в психро-, мезо- та термофільному режимах вихід біогазу знаходиться в межах $1 \dots 400 \text{ м}^3/\text{добу}$. При віднесенні виходу біогазу до перерізу апарату приведена швидкість складає $w_{\Gamma} = 1 \cdot 10^{-5} \dots 4,56 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$.

Для раціонального проведення термостабілізації, на наш погляд, доцільно підводити потік газу саме в область теплообмінної поверхні без утворення барботажного шару по всьому перерізу реактора, що значно зменшить витрати на барботування. Літературні джерела з результатами досліджень таких процесів нам невідомі.

Мета даної роботи дослідити інтенсивність теплообміну та гідродинамічні особливості при локальному підводі газової фази в область теплообміну нагрівника з об'ємом рідини в діапазонах зміни параметрів, що відповідають режимам роботи реакторів БГУ.

При проведенні досліджень використана установка, детальний опис якої наведений в [4]. Ємкість з прозорими стінками, що має розміри $600 \times 320 \text{ мм}$ заповнена водою на висоту 190 мм . На відстані 110 мм нижче рівня рідини встановлений тепловиділяючий елемент (ТВЕ), в середині якого розміщений прямий електричний нагрівник довжиною 340 мм , електричним опором 40 Ом . Він встановлений в товстостінну трубку, виготовлену із сталі Ст3 зовнішнім діаметром 25 мм . Напруга на нагрівник подається через стабілізований блок живлення ЛІПС-68, навантаження конт-

ролюється лабораторним амперметром Э59 і вольтметром Щ4313. Відносна похибка вимірювання сили струму та напруги не перевищує 2,2% і 1,1% відповідно. При цьому відносна похибка визначення питомого теплового потоку 2,1...4,3 %. Вимірювання температур проводиться за допомогою 15 хромель-копелевих термопар. Діаметр дротів 0,2 мм. Подовжувальні дроти зведені на перемикач ПТИ-М. Вимірювання термо-ЕРС проводиться компенсаційним методом за допомогою потенціометра Р330 і цифрового вольтметра Щ300. Температура рідини вимірюється термощупами на відстані 50 мм від вісі ТВЕ і визначається як середньоарифметична величина між показаннями в трьох точках по довжині елемента. Величина температури на стінці є середньоарифметичною показань 12 термопар в стінці. Температура повітря в приміщенні вимірювалась термометром ТЛ-4. Похибка вимірювання температур складала до 0,1 °С, похибка визначення температурного напору 0,68...12 %, коефіцієнту тепловіддачі - 2,78...14,5 %.

При створенні газорідинного середовища виникла проблема рівномірного розподілу невеликої витрати газу V_{Γ} вздовж ТВЕ. На наш погляд, недоцільно використовувати барботажний пристрій (БП) з великою кількістю малих отворів діаметром значно менше 1 мм. Тому в об'ємі рідини на відстані 10 мм від дна ємкості встановлена гребінка з рівномірно розташованими по довжині ТВЕ отворами діаметром 1,5 мм. На отвори повітря надходить з двох протарованих скляних посудин, звідки воно витісняється почергово з водопровідної мережі. Загальний об'єм посудин 33 літри. Температура води, якою витісняється повітря, несуттєво відрізняється від температури води в ємкості з ТВЕ. Тиск в резервуарах вимірюється дифманометрами, об'ємна витрата води – за допомогою мірної лінійки та секундоміра. Вимірювання частки перерізу, що омивається газорідинним середовищем відбувається візуально за допомогою мірної лінійки з ціною позначки 2,5 мм.

При обробці результатів використані величини приведені швидкості газу (рис. 1):

1) віднесена до площі перерізу ємкості (рис. 1 а): $w_{\Gamma\epsilon} = V_{\Gamma} / \Omega$;

2) віднесена до повздовжнього перерізу трубки (рис. 1 б): $w_{\Gamma T} = V_{\Gamma} / \omega_T$;

3) віднесена до частки перерізу, що омивається газорідинним середовищем (рис. 1 г):

$$w_{\Gamma\psi} = V_{\Gamma} / \omega_{\Gamma\psi} .$$

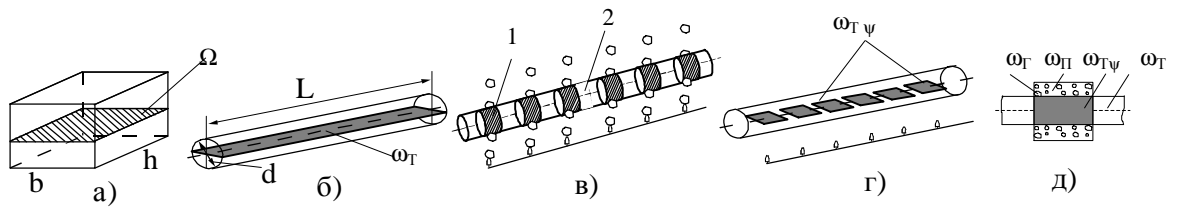


Рис.1 – До визначення характерних перерізів приведені швидкості газу. а) – для швидкості, віднесеної до перерізу ємкості $\Omega = b \cdot h$; б) – площа повздовжнього перерізу трубки $\omega_{Г} = d \cdot L$; в) – розподіл газу по поверхні трубки, 1 – частка трубки ψ , що омивається газорідинним потоком, 2 – частка трубки $(1 - \psi)$, що не омивається таким потоком; г) – частка площі повздовжнього перерізу трубки, що омивається газорідинним потоком $\omega_{Г\psi} = \omega_{Г} \cdot \psi$; д) – площа перерізу потоку газової фази $\omega_{Г}$ і газорідинного потоку $\omega_{П}$.

Для дослідження впливу діаметру отвору на частку перерізу ψ проведені дослідження із

одиначними отворами діаметром 1,5 мм та 5 мм. Як видно

з графіка на рис. 2, діаметр отвору незначно впливає на

ψ . Використання отворів великого діаметру дозволяє за-

безпечувати більшу витрату газу при дотриманні невисо-

ких значень тиску в системі. При $w_{ГТ} = 0,0143$ м/с тиск в

системі з отвором $d_0 = 1,5$ мм на 300 мм вод. ст. переви-

щував такий показник системи з $d_0 = 5$ мм.

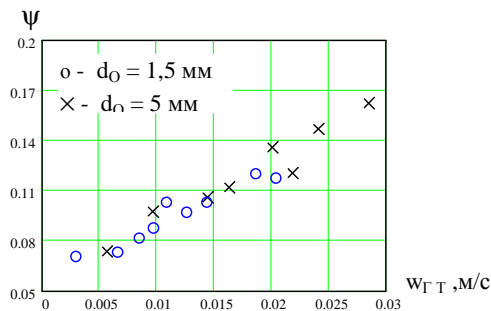


Рис. 2 – Розподіл перерізу ТВЕ, що омивається газорідинним потоком при різному діаметрі отвору БП

Для визначення характеристик нерівномірності

омивання теплообмінної поверхні газорідинним середовищем були проведені дослідження при

різній кількості отворів БП діаметром 1,5 мм, які розташовувались симетрично вздовж ТВЕ. Ос-

новні параметри змінювались в таких діапазонах : витрата газу $V_{Г} = (0,4...2,4) \cdot 10^{-4}$ м³/с, приведе-

на швидкість газу $w_{ГТ} = 0,005...0,035$ м/с, температура рідини $t_p = 20...22$ °С. Узагальнюючи ре-

зультати досліджень, представлені на рис.3, вплив нерівномірності підводу газової фази доцільно

описати параметром n_L , що виражає

кількість отворів n_0 , встановлених

на одиницю довжини елемента L .

Така величина змінювалась в діапа-

зоні $n_L = 2,94...17,65$ м⁻¹. За допомо-

гою програми Statistica 5.0, методом

Квазі-Ньютона з коефіцієнтом детер-

мінації $R = 0,986$ отримано

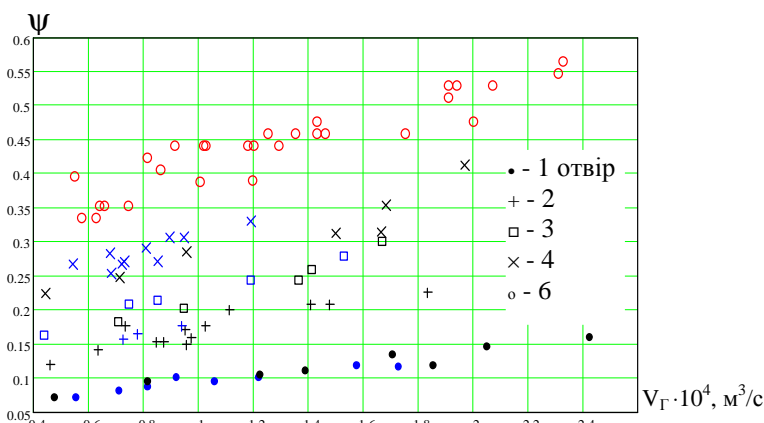


Рис.3 – Залежність частки перерізу, що омивається газорідинним потоком ψ , від витрати газу $V_{Г}$ при різній кількості отворів БП

$$\psi = 0,81 \cdot V_{\Gamma}^{0,32} \cdot n_L^{0,78} \quad (1)$$

Важливою гідродинамічною характеристикою двофазного потоку є дійсний об'ємний газозміст ϕ_{Γ} . Залежності, розроблені для ϕ_{Γ} в локальному нерівномірному газорідинному середовищі нам не відомі. Для визначення ϕ_{Γ} можливо використати результати досліджень, що наведені вище. Ширина ділянки ТВЕ, що омивається газорідинним потоком, може бути прийнята в якості діаметра такого потоку. Тоді сума діаметрів газорідинних потоків з встановлених отворів складає

$$\Sigma D_{\Pi} = \psi \cdot L \quad (2)$$

Сумарна площа газорідинних потоків з n_0 отворів (рис. 1 д)

$$\omega_{\Pi} = \frac{\pi \cdot (\psi \cdot L)^2}{n_0 \cdot 4} \quad (3)$$

Площа перерізу потоку газової фази за спрощеним підходом

$$\omega_{\Gamma} = V_{\Gamma} / w_{\text{Б}} \quad (4)$$

де $w_{\text{Б}}$ – швидкість підйому газових бульбашок, визначається за залежністю [5]

$$w_{\text{Б}} = 1,5 \cdot 4 \sqrt{\frac{\sigma \cdot g \cdot \Delta \rho}{\rho_{\text{Р}}^2}} \quad (5)$$

$\rho_{\text{Р}}$, $\Delta \rho$, σ - густина рідини, різниця густин рідини та газу, коефіцієнт поверхневого натягу на границі газ-рідина.

По визначенню $\phi_{\Gamma} = \frac{\omega_{\Gamma}}{\omega_{\Pi}}$, то, враховуючи (3),(4),(5) отримаємо

$$\phi_{\Gamma} = 0,849 \frac{w_{\Gamma} \cdot \omega_{\Gamma} \cdot n_0}{(\psi \cdot L)^2} \cdot 4 \sqrt{\frac{\rho_{\text{Р}}^2}{\sigma \cdot g \cdot \Delta \rho}} \quad (6)$$

Повільність зростання газозмісту ϕ_{Γ} на 25...40 % із ростом швидкості газу w_{Γ} в 3 рази

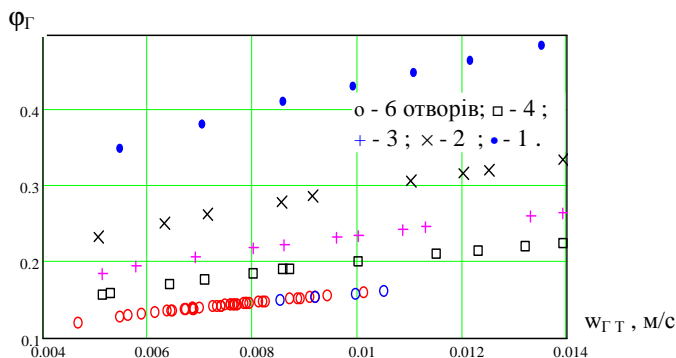


Рис. 4 – Дійсний об'ємний газозміст ϕ_{Γ} в залежності від приведеної швидкості газу w_{Γ} і кількості отворів БП

(рис.4) пояснюється одночасним підвищенням перерізу ω_{Π} , яким рухається газорідинний потік. Більш високе значення ϕ_{Γ} при меншій кількості отворів БП підтверджується візуальними спостереженнями і пояснюється зростанням розмірів бульбашок.

До групи факторів, що впливають на інтенсивність теплообміну віднесені: геометричні розміри, матеріал та стан поверхні тепловиділяючого елемента, висота шару рідини над елементом, орієнтація поверхні нагріву, спосіб обігріву, тиск в посудині, рівномірність подачі газового потоку на поверхню теплообміну, глибина занурення та діаметр отворів БП, температура та теплофізичні властивості рідини, питомий тепловий потік q , витрата газової фази.

Згідно даних авторів [2] геометричні розміри теплообмінної поверхні не впливають на інтенсивність теплообміну з газорідинним середовищем. Відстань від отворів БП до вісі ТВЕ 60 мм, це відповідає зоні стабілізації φ_{Γ} (за [5] – 30...40 мм), за оцінками [3] $\varphi_{\Gamma} = \text{const}$ за умови

$$\sqrt{g \cdot D_{\epsilon} / w_{\Gamma}} \geq 20 \quad (7)$$

Для досліджуваної ємкості гідравлічний діаметр $D_{\epsilon} = 0,418$ м, то майже для всього діапазону зміни w_{Γ} виконується $\varphi_{\Gamma} = \text{const}$. Тому, отримані результати можуть бути розповсюджені на процеси омивання теплообмінних поверхонь, що розташовані на різній глибині.

Діапазон зміни основних параметрів: $t_p = 22...34$ °C, $q = 0,5...15$ кВт/м², $V_{\Gamma} = (0,4...1,275) \cdot 10^{-4}$ м³/с, $n_L = 2,94...17,65$ м⁻¹. Решта факторів прийняті сталими величинами, вплив їх зміни на теплообмін не досліджувався. Вважалось, що процес теплообміну усталений при

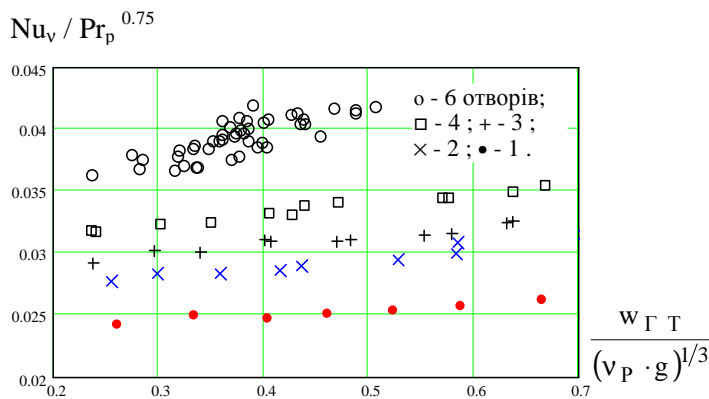


Рис. 5 – Інтенсивність тепловіддачі від стінки ТВЕ до локально-го нерівномірного газорідинного середовища при різній кількості отворів БП

зміні температури рідини не більше 0,1 °C за 5 хвилин.

При обробці результатів (рис. 5) виявилось, що вплив питомого теплового потоку на інтенсивність теплообміну незначний. Тому розрахункову залежність доцільно побудувати, виходячи з формули авторів [2]

$$\alpha \left(\frac{v_p^2}{g} \right)^{0.333} / \lambda_p = 0,108 \cdot \left(w_{\Gamma} / (v_p \cdot g)^{0.333} \right)^{0.22} \cdot (Pr_p)^{0.48} \quad (8)$$

де v_p , Pr_p – коефіцієнт кінематичної в'язкості та критерій Прандтля рідини.

За лінійний розмір доцільно приймати масштаб прикордонного шару, оскільки діаметр ТВЕ, за [2], не впливає на тепловіддачу. Використовуючи програму Statistica 5.0,

методом Квазі-Ньютона з $R = 0,9644$ отримано розрахункову залежність

$$Nu_v = 0,02 \cdot \left(w_{\Gamma T} / (v_p \cdot g) \right)^{0,333} \cdot Pr_p^{0,095} \cdot (Pr_p)^{0,75} \cdot (n_L)^{0,28}, \quad (9)$$

Для узагальнення отриманих результатів з залежністю (8) методом Хука-Дживиса з коефіцієнтом $R = 0,933$ отримана залежність

$$Nu_v = 0,034 \cdot \left(w_{\Gamma T} / (v_p \cdot g) \right)^{0,22} \cdot (Pr_p)^{0,48} \cdot (n_L)^{0,28} \quad (10)$$

Співставлення коефіцієнтів залежностей (8) і (10) виявляє, що для барботажного колонного апарату еквівалентна величина $n_L = 62 \text{ м}^{-1}$. А це відповідає геометричним характеристикам стандартних ґраток колонних газорідинних апаратів [2].

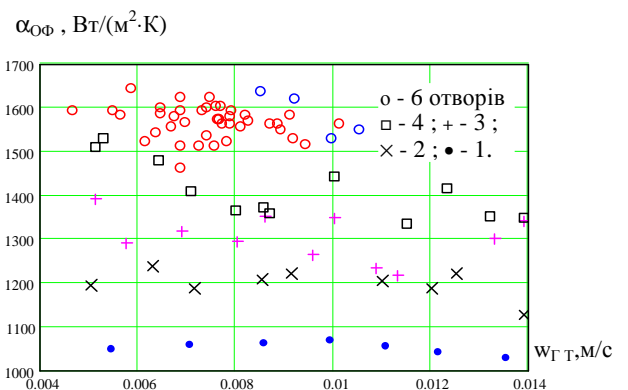
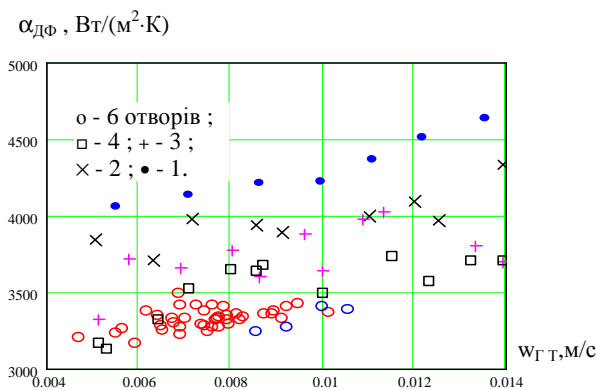
Слід відзначити, що у вказаному діапазоні параметрів залежності авторів [2,3] мають розбіжність не більше 15 %.

Для отримання більш повного уявлення про процеси теплообміну між ТВЕ та нерівномірним газорідинним середовищем слід розглянути тепловіддачу в областях поверхні, що омивається однофазним $\alpha_{\text{оф}}$ та двофазним $\alpha_{\text{дф}}$ середовищем. Залежність для визначення осередненого по поверхні ТВЕ коефіцієнта тепловіддачі при нерівномірному підводі газу

$$\alpha_{\Sigma} = \psi \cdot \alpha_{\text{дф}} + (1 - \psi) \cdot \alpha_{\text{оф}} \quad (11)$$

Вважаємо, що на частині ψ перерізу ТВЕ підвід газової фази рівномірний і інтенсивність тепловіддачі $\alpha_{\text{дф}}$ описується залежністю (8), де слід використовувати приведену швидкість газової фази, віднесена до суми перерізів $\Omega_{\Gamma \psi}$ та Ω_{Π} .

Використовуючи експериментальні дані інтенсивності тепловіддачі в якості осереднених по поверхні ТВЕ, розрахувавши $\alpha_{\text{дф}}$ за (8) (рис. 6), з рівняння (11) можна визначити $\alpha_{\text{оф}}$ (рис. 7).



При проведенні дослідів також визначався характер конвективних потоків над ТВЕ між струменями газу. Це виконувалося за допомогою прапорців, візуально. При спрощеному підході можна прийняти, що на ділянках поверхні, що омиваються однофазним середовищем, існують лише підйомні токи рідини. Тоді, використовуючи відомі залежності для розрахунку тепловіддачі при вимушеному поперечному омиванні горизонтальних труб [6], можна визначити, що швидкість однофазного середовища на вказаних ділянках складає 0,03...0,07 м/с. А розрахункова швидкість підйому бульбашок за залежністю (5) $w_B \approx 0,244$ м/с. На наш погляд, таке співвідношення швидкостей допустиме.

ВИСНОВКИ

В даній статті експериментально досліджені гідродинамічні особливості та інтенсивність тепловіддачі в локальному нерівномірному газорідинному середовищі, що омиває теплообмінну поверхню. Розроблена залежність для визначення частки теплообмінної поверхні, що омивається газорідинним середовищем. Оцінено інтенсивність тепловіддачі від суміжних ділянок ТВЕ, що контактують з одно- та двофазним середовищем. Розроблені залежності для визначення інтенсивності тепловіддачі від твердої стінки до локального нерівномірного газорідинного середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ткаченко С.Й., Степанов Д.В. Мінімізація витрат ексергії на живлення біогазової установки енергією //Вісник ВПІ, 2000, - № 4, - С. 50 – 57.
2. Пенный режим и пенные аппараты / Под ред. И.П. Мухленова, Л.: Химия, 1977. – 305 с.
3. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. –Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
4. Ткаченко С.Й., Степанов Д.В., Спивак О.Ю. Стабілізований теплообмін в системі : нагрівальний елемент–обмежений об'єм рідини –навколишнє повітря //Вісник ТУП, 2001, - № 1, - С. 27-31.
5. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. –М.: Энергия, 1976. – 289 с.
6. Исаченко В.П. Теплопередача: Учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

АВТОРИ

1. Прізвище : **Ткаченко**
2. Ім'я : **Станіслав**
3. По батькові : **Йосипович**
4. Заклад, в якому займається науковою діяльністю :
Вінницький державний технічний університет
5. Посада : **завідувач кафедри теплоенергетики, газопостачання та інженерного забезпечення будівництва**
6. Вчений ступінь : **доктор технічних наук**
7. Вчене звання : **професор**
8. Телефон : **44 – 06 - 27**

1. Прізвище : **Степанов**
2. Ім'я : **Дмитро**
3. По батькові : **Вікторович**
4. Заклад, в якому займається науковою діяльністю :
Вінницький державний технічний університет
5. Посада : **Аспірант кафедри теплоенергетики газопостачання та інженерного забезпечення будівництва**
6. Вчений ступінь : **Магістр**
7. Телефон : **43 – 12 – 21**