

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 631.731

С. Й. Ткаченко, д. т. н., проф.; Н. В. Резидент, асп.; Є. П. Ларюшкін, к. т. н.

С. И. Ткаченко, д. т. н., проф.; Н. В. Резидент, асп.; Е. П. Ларюшкин, к. т. н.

S. Tkachenko, Dr. sc. (Eng.), Prof.; N. Resydent, Post-Graduate; E. Lariushkin, Cand. Sc. (Eng.)

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ
ТЕПЛОВІДДАЧІ ДО БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ОРГАНІЧНИХ
СУМІШЕЙ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОТДАЧИ К
МНОГОКОМПОНЕНТНЫМ ОРГАНИЧЕСКИМ СМЕСЯМ**

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF HEAT EMISSION INTENSITY TO MULTI-
COMPONENT ORGANIC MIXTURES**

Розроблено експериментальний стенд для дослідження теплообміну. Наведено методики проведення, вимірювань і обробки дослідних даних. Досліджено та проаналізовано інтенсивність теплообміну до багатокомпонентних органічних сумішей в умовах роботи систем біоконверсії.

Разработан экспериментальный стенд для исследования теплообмена. Приведены методики проведения измерений и обработки данных исследований. Исследована и проанализирована интенсивность теплообмена к многокомпонентным органическим смесям в условиях работы систем биоконверсии.

An experimental stand for research of heat exchange is developed. Methods of implementation, measuring and treatment of experiments are led. Be explored and analysed intensity of heat exchange to the multi-component organic media for conditions of work of the bioconversion systems.

Вступ

Температурний режим суттєво впливає на якість технологічного процесу та продуктивність біогазової установки (БГУ), оскільки коливання температур в межах 4...5 °С різко змінює мікробіологічну активність [1].

Підігрівання субстрату здійснюється як безпосередньо в біореакторі (БР), так і зовні в спеціальному підігрівнику. Останній метод має ряд переваг. По-перше, різниця температур між субстратом в БР і субстратом, що надходить до нього, дуже мала. По-друге, розташування підігрівника поза БР значно полегшує його експлуатацію і ремонт. При цьому, підігрів субстрату перед БР здійснюється як в анаеробних, так і в аеробних умовах.

Сировиною для виробництва біогазу можуть бути відходи сільського господарства (стоки тваринницьких ферм і птахофабрик, а також відходи рослинництва), муніципальні та промислові стоки, які містять органічні речовини. Сумісне зброджування кількох видів відходів зумовлює збільшення виходу біогазу на одиницю об'єму метантенка [2]. В результаті утворюються суміші з різним складом органічних речовин, з різним масовим співвідношенням, з наперед невизначеними теплофізичними параметрами.

Для виявлення та обґрунтування залежностей для оцінки значень коефіцієнтів тепловіддачі необхідно визначати теплофізичні властивості субстратів різного походження відповідно до умов, в яких працюють БГУ. Дослідження теплофізичних властивостей такої групи комбінацій сумішей складає додаткові труднощі та залишається проблематичним [3, 4]. Для вологих матеріалів, у тому числі матеріалів рослинного та тваринного походження, визначення теплофізичних властивостей ускладнюється різноманітністю сумішей,

наявністю процесів масообміну, хімічних та біологічних перетворень, а дослідження тонких ниток, тонких плівок товщиною в декілька мікрметрів важко реалізувати в промислових умовах [5].

Метою роботи є розробка експериментального стенду, методики вимірювань, постановки експерименту, дослідження та аналіз теплообміну до багатокомпонентного середовища.

Введение

Температурный режим существенно влияет на качество технологического процесса и производительность биогазовой установки (БГУ), поскольку колебание температур в диапазоне 4...5 °С резко изменяет микробиологическую активность [1].

Подогрев субстрата осуществляется как непосредственно в биореакторе (БР), так и вне реактора в специальном подогревателе. Последний метод имеет ряд преимуществ. Во-первых, разница температур между субстратом в БР и субстратом, который поступает в него, очень мала. Во-вторых, размещение подогревателя вне БР значительно облегчает его эксплуатацию и ремонт. При этом, подогрев субстрата до БР производится как в анаэробных, так и в аэробных условиях.

Сырьём для производства биогаза могут быть отходы сельского хозяйства (стоки животноводческих ферм и птицефабрик, а также отходы после переработки растений), муниципальные и промышленные стоки, которые содержат органические вещества. Совместное брожение нескольких видов отходов обуславливает увеличение выхода биогаза на единицу метантенка [2]. В результате образуются смеси с разным составом органических веществ, с разным массовым соотношением, с заведомо неопределёнными теплофизическими свойствами.

При определении и обосновании зависимостей для оценки значений коэффициентов теплоотдачи необходимо определять теплофизические свойства субстрата разного происхождения в соответствии с условиями, в которых работают БГУ. Исследование теплофизических свойств такой группы комбинаций смесей составляет дополнительные трудности и остаётся проблематическим [3, 4]. Для влажных материалов, в том числе материалов растительного и животного происхождения, определение теплофизических свойств усложняется разнообразием смесей, существованием процессов массообмена, химических и биологических преобразований, а исследование тонких нитей, тонких плёнок толщиной в несколько микрометров тяжело реализовать в производственных условиях [5].

Целью работы является разработка экспериментального стенда, методики измерений, постановки эксперимента, исследование и анализ теплообмена к многокомпонентной среде.

Introduction

The temperature conditions have a substantial influence on the quality of technological process and the productivity of biogas unit (BGU), as temperature fluctuations within 4...5 °C change the microbiological activity rapidly [1].

The substance heating is performed directly in the bioreactor (BR) as well as outside in the special heater. The latter method has some advantages. First, the difference between the substance temperature in BR and the one that enters it is very slight. Second, the heater location outside BR makes its maintenance and repair much easier. Besides, the substance heating before BR is performed both under anaerobic and aerobic conditions.

The raw material for biogas production can be found among the wastes of agricultural production (cattle and poultry farm sewage, plant wastes), municipal and industrial sewages, containing organic matters. Joint fermentation of several wastes types results in the increased biogas output on unit metantank [2]. As the result the mixtures with different organic matters contents, different mass correlation, indefinite heat-physical parameters are formed.

For determination and substantiation of dependences to evaluate the coefficient of convective heat transfer it is necessary to determine the heat and physical properties of substances of different origin according to the conditions under which BR operates. The research of heat and physical properties of such mixture combination groups contains extra difficulties and remains problematic [3, 4]. So, for wet materials, including materials of plant and cattle origin, the definition of heat and physical properties is complicated by the variability of mixtures, the presence of mass exchange processes, chemical and biological conversions. The study of thin threads, thin films being several micrometers thin are generally not possible in the terms of industry [5].

The aim of this article is working out the experimental stand, methodology of measuring, carrying out the research, studying and analyzing of heat transfer in multi-component environment.

Експериментальна установка і результати досліджень

Органічні частинки рослинного походження в багатокомпонентному середовищі являють собою відходи, які одержані в процесі очищення насіння буряка, розміри твердих частинок $d_t = 0,1...1$ мм — 70 %, $d_t = 10...20$ мм — 1 %, 1 мм $< d_t < 10$ мм — 29 %.

Експериментальний стенд (рис. 1) складається із трьох підсистем. Підсистема I — ємність 1 з теплообмінником 3 та мішалкою 2. Ємність являє собою циліндр діаметром $D = 0,175$ м; висотою $L = 0,475$ м, який закритий зверху.

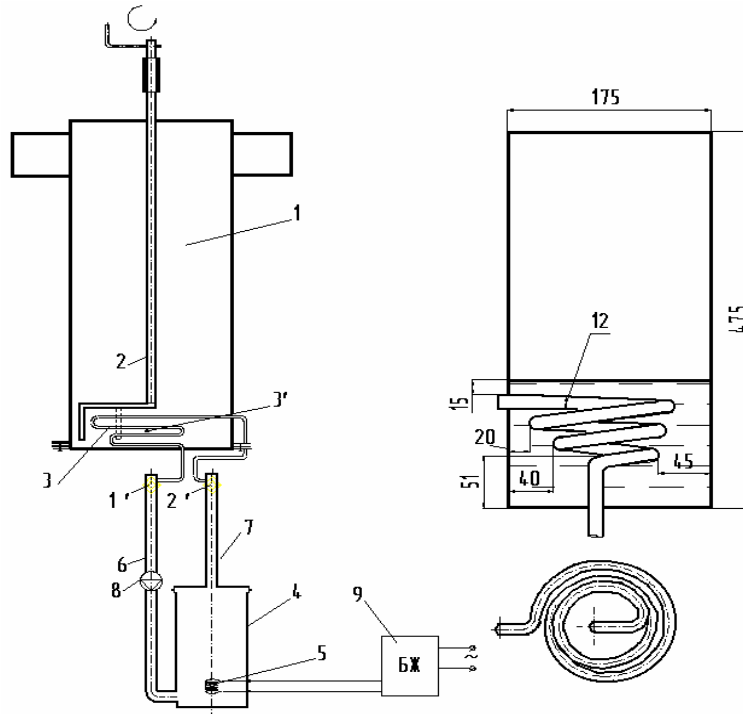


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки: підсистема I — 1 — ємність; 2 — пристрій для перемішування; 3 — теплообмінник; підсистема II — 4 — корпус теплогенератора; 5 — електронагрівний елемент; 6, 7 — піднімальна та опускна труби відповідно; 8 — відцентровий насос; підсистема III — 1', 2', 3' — термопары

Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: подсистема I — 1 — ёмкость; 2 — приспособление для перемешивания; 3 — теплообменник; подсистема II — 4 — корпус теплогенератора; 5 — электронагревательный элемент; 6, 7 — подъёмная и опускная трубы соответственно; 8 — центробежный насос; подсистема III — 1', 2', 3' — термопары

Fig. 1. The principal scheme of the experimental unit: subsystem I — 1 — vessel; 2 — agitator; 3 — heat exchanger; subsystem II — 4 — body of heat generator; 5 — electric heating element; 6, 7 — elevating and lowering pipes respectively; 8 — centrifugal pump; subsystem III — 1', 2', 3' — thermocouples

Підсистема II — підсистема підготовки і подачі теплоносія в теплообмінник 3, що розташований в ємності 1 із сумішшю. Таким чином, змієвиковий теплообмінник (ЗТО) 3 є одночасно і елементом підсистеми підготовки, і подачі теплоносія. Підсистема II включає такі елементи: змієвиковий теплообмінник 3, корпус теплогенератора 4, опускна 6 та піднімальна 7 труби, відцентровий насос 8, повітровідвідник, електронагрівник (ТЕН) 5 і блок живлення 9. Потужність ТЕНа, регулювалась автотрансформатором.

Вимірювальні прилади на стенді: хромель-копелеві термопары 1', 2', 3' типу L з індивідуальним градуванням, вольтметр типу Щ4313, лабораторний амперметр типу Э59, цифровий мілівольтметр типу Щ300. Відносна похибка вимірювання сили струму та напруги не перевищувала 1,1 % та 2,2 % відповідно. Похибка вимірювання температури середовища складає 0,075 °С.

Здійснювались дві серії дослідів. В обох серіях масова концентрація сухих речовин C_c в суміші змінювалась від 4 до 14 %, температура — в діапазоні 20...40 °С. Електрична потужність залишалась сталою під час проведення серії досліджень. Теплова потужність теплообмінника з підвищенням температури грієної води дещо знижувалась, в зв'язку з тепловими втратами в навколишнє середовище (рис. 2).

Перша серія досліджень теплообміну між ЗТО і сумішшю проводилась таким чином.

Заливалась вода в ємність, включалась підсистема II. Фіксувалась температура води в ємності та температура грійної води на вході і виході зі змієвикового теплообмінника. В разі досягнення рідиною в ємності 1 температури $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$ підсистема II відключалась. Після досягнення водою температури навколишнього середовища в неї засипалась перша порція органічної речовини в такій кількості, щоб масова концентрація сухих речовин в суміші складала $C_c = 4\text{ }\%$.

Після цього перемішували суміш в ємності, за допомогою мішалки з кількістю обертів — 38...40 об/хв. Паралельно включали підсистему II, фіксували всі вказані вище температури. Перемішування суміші здійснювалось періодично з інтервалом в 15 хвилин. Температура вимірювалась перед черговим перемішуванням, тобто через 15 хвилин після попереднього перемішування.

З досягненням температури суміші $t_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$ підсистема II відключалась. Суміш охолоджувалась до температури навколишнього середовища t_0 і в неї додавали органічні речовини в такій кількості, щоб масову концентрацію сухих речовин підвищити на 2%. Далі дослід проводився за методикою описаною вище. При цьому концентрація змінювалась від 2 до 14%.

Серія дослідів з часом витримки суміші 170 год перед початком експерименту була організована таким чином. Суміш з масовою концентрацією $C_c = 4\text{ }\%$ вистоялась в приміщенні з температурою 17...24 $^\circ\text{C}$ 170 годин і заливалась в ємність. Рівень заповнення ємності $h = 125\text{ мм}$, висота вільної поверхні суміші над теплообмінником $h_1 = 25\text{ мм}$.

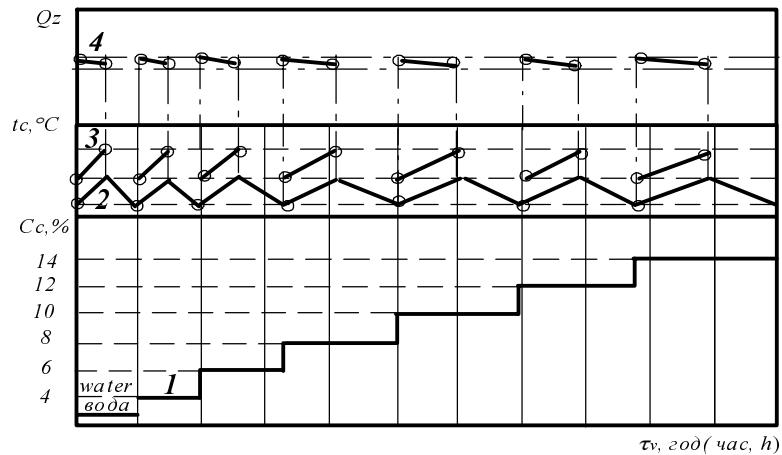


Рис. 2. Карта проведення експерименту: 1 — крива масової концентрації сухих речовин; 2 — зміна температури суміші в ємності; 3 — зміна середньої температури грійної води в ЗТО; 4 — зміна теплової потужності ЗТО

Рис. 2. Карта проведения опытов: 1 — кривая массовой концентрации сухих веществ; 2 — изменение температуры смеси в ёмкости; 3 — изменение средней температуры греющей воды в ЗТО; 4 — изменение тепловой мощности в ЗТО

Fig. 2. Process chart: 1 — dry matter mass concentration curve; 2 — temperature changes of mixture in the tank; 3 — average heating water changes in CHE; 4 — heat capacity changes in CHE

Питомий тепловий потік від грійної води до суміші визначався за формулою

$$q_c = Q_z / F, \tag{1}$$

де Q_z — тепла потужність ЗТО, Вт (тепловая мощность, Вт; heat output, Wt); F — площа поверхні нагріву ЗТО, м^2 (площадь поверхности нагрева, м^2 ; heating surface area, m^2).

Величина Q_z визначалась з балансового рівняння

$$Q_z = Q_{EH} - \Sigma Q_v - \Sigma Q_a, \tag{2}$$

де Q_{EH} — тепла потужність електронагрівника (тепловая мощность электронагревателя; heat output of electric heater); ΣQ_v — сумарна тепла потужність втрат, яка включає втрати на нагрівання стінок корпусу теплогенератора, втрати через поверхню корпусу та теплову ізоляцію, втрати в піднімальній та опускній трубах циркуляційного контуру (сумарная тепловая мощность потерь, в которую входят потери на нагревание стенок корпуса и тепловую изоляцию, потери в подъёмной и опускной трубах циркуляционного контура; total output of heat losses, which includes losses on heat generator body heating, losses through the body surface and heat isolation, losses in elevating and lowering pipes of the circuit.); ΣQ_a — сумарна тепла потужність, яка акумулю-

ється теплоносієм в циркуляційному контурі та в кожусі теплогенератора (суммарная тепловая мощность, которая аккумулируется теплоносителем в циркуляционном контуре и в кожухе теплогенератора; total heat output, accumulated by the heat-transfer agent in the circuit and in the housing of the heat generating unit.).

Сумарна теплова потужність втрат визначалась експериментально і розрахунково. Частина втрат теплоти від циркуляційного контуру в навколишнє середовище, які визначені експериментально, по відношенню до електричної потужності ТЕНа складала 16...25 %.

Відносна похибка в обчисленнях Q_z оцінювалась в 2,5 %, яка за умов зіставлення з альтернативними методиками виявилась найменшою.

Розбіжність між експериментальним та розрахунковим значеннями втрат теплоти від циркуляційного контуру $\delta' = 2...15$ %.

Коефіцієнт тепловіддачі до суміші визначається за формулою

$$\alpha = q_c / \theta_c, \tag{3}$$

де $\theta_c = t_{st} - t_c$ – середній температурний напір між зовнішньою стінкою поверхні нагріву і сумішшю, °C (средний температурный напор между внешней стенкой поверхности нагрева и смесью, °C); t_{st} – середня температура зовнішньої стінки ЗТО, °C; (средняя температура внешней стенки, °C); t_c – середня температура внутрішньої стінки ЗТО, °C; (средняя температура внутренней стенки, °C).

Температура зовнішньої стінки теплообмінника приймалась як середня температура теплоносія в циркуляційному контурі з урахуванням термічного опору стінки δ/λ і термічного опору тепловіддачі $1/\alpha_v$ з боку грійної води, тобто

$$t_{st} = t_v - q_c \left(\frac{1}{\alpha_v} + \frac{\delta}{\lambda} \right). \tag{4}$$

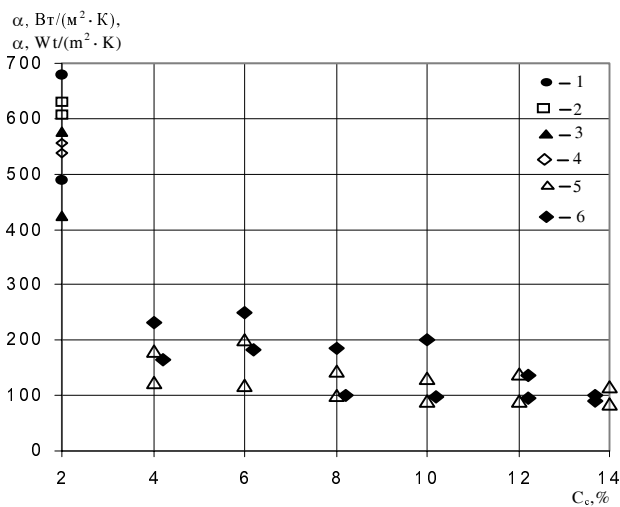


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів тепловіддачі від концентрації сухих речовин: 1...4 – розрахункові та експериментальні значення для води; 5, 6 – суміш, $\tau = 0$ год і $\tau_v = 170$ год.

Рис. 3. Значения коэффициентов теплоотдачи в зависимости от концентрации сухих веществ: 1...4 — расчетные и экспериментальные значения для воды; 5, 6 — смесь, $\tau = 0$ час и $\tau_v = 170$ час

Fig. 3 The notion of heat emission coefficient depending upon dry matter concentration: 1...4 — calculated and experimental results for water; 5, 6 — mixture, $\tau = 0$ h and $\tau_v = 170$ h

За результатами обробки даних серії налагоджувальних дослідів встановлено, що відносна похибка для визначення коефіцієнтів тепловіддачі за наведеною вище методикою не перевищувала 8...10 %.

На рис. 3 показані експериментальні та розрахункові залежності коефіцієнтів тепловіддачі від грійної стінки ЗТО до органічних сумішей з різними концентраціями сухих речовин в воді та до води в умовах сталої теплової потужності електронагрівника ($Q_E = 96$ Вт). Експериментальні та розрахункові дані для води практично збігаються, точки 1–2. На рис. 3: точки 1, 3 – розрахункові значення для води при температурах 20 і 40 °C для умов вільної конвекції і за наявності перемішування, відповідно; 2, 4 – експериментальні значення для води при температурах 20 і 40 °C в умовах вільної конвекції і за наявності перемішування, відповідно; 5, 6 – суміш, з часом витримки перед експериментом $\tau_v = 0$ год та $\tau_v > 170$ год.

Коефіцієнти тепловіддачі для води обчислювались за відомою критеріальною залежністю

$$Nu = 0,5(Gr \cdot Pr)^{0,25}, \tag{5}$$

ною залежністю

де Gr — критерій Грасгофа (критерий Грасгофа; *Grasshoff criterion*); Pr — критерій Прандтля (критерий Прандтля; *Prandtl criterion*)[6].

Для умови $\tau_v < 170$ год та $170 \leq \tau_v \leq 400$ год спостерігається чітка закономірність $\alpha = f(C_c)$ для $t_c = 20...40$ °С з відхиленням від усереднених значень до 22 %, точки 3 та 4 на рис. 3. Але в даному випадку можна допустити наявність залежності $\alpha = f(C_c, \tau_v)$ для органічних домішок указаної вище природи.

В процесі досліджень нами спостерігалось як двофазна система «тверда дисперсна фаза — рідке дисперсійне середовище», що з часом перетворювалась на трифазну систему «тверда дисперсна фаза — рідке дисперсійне середовище — газова фаза». Додатково з'являлась газова фаза внаслідок біохімічних реакцій. Як відомо з літератури [7–10], такі суміші характеризуються тиксотропністю та полідисперсністю, що приводить до утворення двох шарів із твердих частинок: верхнього шару з твердими частинками та нижнього осадового, між якими існує рідка фаза. Тому під час експерименту нами здійснювалось періодичне перемішування середовища для створення завислого шару органічних частинок.

З показаних графічних залежностей (рис. 3) можна зробити висновки, що коефіцієнти тепловіддачі до суміші з часом витримки $\tau_v < 170$ год та $170 \leq \tau_v \leq 400$ год перед експериментом менші в 1,7...7,5 разів в порівнянні з коефіцієнтами тепловіддачі до води ($t = 20...40$ °С). Відхилення від усередненого значення α до суміші не перевищує 40 %. Розбіжність в значеннях α можна пояснити тим, що температура суміші під час проведення експерименту при $C_c = \text{const}$ змінювалась від 20 до 40 °С, а рушійний температурний напір в межах $\Delta t = 6...11$ °С.

Вплив τ_v виявляється в тому, що тверда фаза в процесі бродіння та теплової обробки зв'язує вологу [10], внаслідок чого змінюються її розміри, а також співвідношення між об'ємними складовими компонентів. Але суттєвого впливу часу витримки суміші на інтенсивність теплообміну не виявлено.

Экспериментальная установка и результаты исследований

Органические частицы растительного происхождения в многокомпонентной среде представляют собой отходы, которые получены при очистке семян свеклы, размеры твёрдых частиц $d_t = 0,1...1$ мм — 70 %, $d_t = 10...20$ мм — 1 %, $1 \text{ мм} < d_t < 10 \text{ мм}$ — 29 %.

Экспериментальный стенд состоит из трёх подсистем и показан на рис. 1. Подсистема I — ёмкость 1 с теплообменником 3 и мешалкой 2. Ёмкость представляет собой цилиндр диаметром $D = 0,175$ м; высотой — $L = 0,475$ м, который закрыт сверху.

Подсистема II — подсистема подготовки и подачи теплоносителя в теплообменник 3, который размещён в ёмкости 1 со смесью. Таким образом, змеевиковый теплообменник (ЗТО) является одновременно и элементом подсистемы подготовки, и подачи теплоносителя. Подсистема II состоит из таких элементов: змеевиковый теплообменник 3, корпус теплогенератора 4, опускная 6 и подъёмная 7 трубы, центробежный насос 8, воздухоотводчик, электронагреватель (ТЕН) 5 и блок питания 9. Мощность ТЕНа, регулировалась автотрансформатором.

Измерительные приборы на стенде: хромель-копелевые термомпары 1', 2', 3' типа L с индивидуальным градуированием, вольтметр типа Щ4313, лабораторный амперметр типа Э59, цифровой милливольтметр типа Щ300. Относительная погрешность измерений силы тока и напряжения не превышала 1,1 % и 2,2 % соответственно. Погрешность измерения температур среды составляет 0,075 °С.

Осуществлялись две серии опытов. В обеих сериях массовая концентрация сухих веществ C_c в смеси изменялась от 4 до 14 %, температура — в диапазоне 20...40 °С. Электрическая мощность оставалась постоянной во время проведения серии испытаний. Тепловая мощность теплообменника с возрастанием температуры греющей воды немного уменьшалась в связи с тепловыми потерями в окружающую среду (рис. 2).

Первая серия испытаний теплообмена между ЗТО и смесью производилась таким образом. Заливалась вода в ёмкость, включалась подсистема II. Фиксировалась температура воды в ёмкости и температура греющей воды на входе и выходе из змеевикового теплообменника. При достижении жидкостью в ёмкости 1 температуры $t = 40$ °С подсистема II отключалась. После достижения водой температуры окружающей среды в нее засыпалась первая порция органического вещества в таком количестве, чтоб массовая концентрация сухих веществ в смеси составляла $C_c = 4$ %.

После этого перемешивали смесь в емкости, при помощи мешалки с числом оборотов — 38...40 об/мин. Параллельно включалась подсистема II, фиксировались все указанные выше температуры. Перемешивание смеси производилось периодически с промежутком времени в 15 минут. Температура измерялась перед очередным перемешиванием, то есть через 15 минут после предыдущего перемешивания.

После достижения температуры смеси $t_c = 40$ °С подсистема II отключалась. Смесь охлаждалась до температуры окружающей среды t_0 и в нее добавляли органические вещества в таком количестве, чтоб массовую концентрацию сухих веществ повысить на 2 %. Далее опыт проводился за методикой приведённой выше. При этом концентрация в опытах изменялась от 2 до 14 %.

Серия опытов со временем выдержки смеси 170 часов перед началом эксперимента была организована таким образом. Смесь с массовой концентрацией $C_c = 4$ % выстаивалась в помещении с температурой 17...24 °С 170 часов и заливалась в ёмкость. Уровень заполнения ёмкости $h = 125$ мм, высота свободной поверхности смеси над теплообменником $h_1 = 25$ мм.

Удельный тепловой поток от греющей воды к смеси определялся по формуле (1).

Величина Q_z определялась из балансового уравнения (2).

Суммарная тепловая мощность потерь определялась экспериментально и рассчитывалась. Доля потерь теплоты от циркуляционного контура в окружающую среду, которые определены экспериментально, по отношению к электрической мощности ТЕНа, составляет 16...25 %.

Относительная погрешность в вычислениях Q_z оценивалась в 2,5 %, которая при сопоставлении с альтернативными методиками оказалась наименьшей погрешностью.

Расхождение между экспериментальными и расчётными значениями потерь теплоты от циркуляционного контура $\delta' = 2...15$ %.

Коэффициент теплоотдачи к смеси определяется по формуле (3).

Температура внешней стенки теплообменника принималась как средняя температура теплоносителя в циркуляционном контуре, с учетом термического сопротивления стенки и термического сопротивления теплоотдачи со стороны греющей воды по зависимости (4).

В результате обработки данных серии наладочных опытов установлено, что относительная погрешность для определения коэффициентов теплоотдачи по приведённой выше методике не превышала 8...10 %.

На рис. 3 приведены экспериментальные и расчетные зависимости коэффициентов теплоотдачи от греющей стенки ЗТО к органическим смесям с разными концентрациями сухих веществ в воде и к воде в условиях постоянной тепловой мощности электронагревателя $Q_E = 96$ Вт. Экспериментальные и расчетные данные для воды практически совпадают, точки 1—2. На рис. 3 точки 1, 3 — расчётные значения для воды при температуре 20 и 40 °С для условий свободной конвекции и при наличии перемешивания соответственно; 2, 4 — экспериментальные значения для воды при температуре 20 и 40 °С для условий свободной конвекции и при наличии перемешивания соответственно; 5, 6 — смесь, со временем выдержки перед экспериментом $\tau_v = 0$ час и $\tau_v > 170$ час.

Коэффициенты теплоотдачи для воды рассчитывались по известной критериальной зависимости (5), [6].

Для условий $\tau_v < 170$ часов и $170 \leq \tau_v \leq 400$ часов отслеживается четкая закономерность $\alpha = f(C_c)$ при $t_c = 20...40$ °С с отклонением от усреднённых значений до 22 %, точки 3 и 4 на рис. 3. Но в данном случае можно допустить существование зависимости $\alpha = f(C_c, \tau_v)$ для органических примесей указанной выше природы.

В процессе испытаний нами наблюдалось как двухфазная система «твердая дисперсная фаза — жидкая дисперсионная среда» со временем преобразовывалась в трёхфазную систему «твердая дисперсная фаза — жидкая дисперсионная среда—газ». Дополнительно появлялась газовая фаза вследствие биохимических реакций. Как известно из литературы [7—10], такие смеси характеризуются тиксотропностью и полидисперсностью, что приводит к образованию двух слоёв из твердых частиц: верхнего слоя с твердыми частицами и нижнего осадочного, между которыми существует жидкая фаза. Поэтому во время эксперимента нами проводилось периодическое перемешивание среды для создания взвешенного слоя органических частиц.

Из зависимостей (рис. 3) можно сделать выводы, что коэффициенты теплоотдачи к смеси со временем выдержки $\tau_v < 170$ часов и $170 \leq \tau_v \leq 400$ часов перед экспериментом меньше в 1,7...7,5 раз по сравнению с коэффициентами теплоотдачи к воде ($t = 20...40$ °С). Отклонение от усреднённого значения α к смеси не превышает 40 %. Разброс в значениях α можно объяснить тем, что температура смеси во время проведения эксперимента при $C_c = \text{const}$ изменялась от 20 до 40 °С, а движущий температурный напор в пределах $\Delta t = 6...11$ °С.

Влияние τ_v проявляется в том, что твердая фаза в процессе брожения и тепловой обработки связывает влагу [10], вследствие чего изменяются ее размеры, а также соотношение между объ-

емными составляющими компонентов. Однако существенного влияния времени выдержки смеси на интенсивность теплообмена не обнаружено.

Experimental stand and research results

Organic particulates of plant origin in multi- component environment are the wastes, obtained by beat purification, the dimensions of dense particulates $d_t = 0,1...1$ mm — 70 %, $d_t = 10...20$ mm — 1 %, $1 \text{ mm} < d_t < 10 \text{ mm}$ — 29 %.

The experimental stand (Fig. 1) consists of three subsystems shown in Fig. 1 Subsystem I — is the vessel 1 with heat exchanger 3 and mixer 2. This vessel is a cylinder with the diameter $D = 0,175$ mm; $L = 0,475$ mm, which is closed from upside.

Subsystem II — is the system of heat transfer agent preparation and feeding in heat exchanger 3, installed in the vessel 1 with the mixture. Thus the coil heat exchanger (CHE) 3 is at the same time the element of preparation subsystem and heat transfer agent element. Subsystem II includes the following elements: coil heat exchanger 3, heat generator body 4, elevating 6 and lowering pipes, centrifugal pump 8, air bleeder, electric heater (EH) 5, and the power supply unit 9. The electric power of EH was regulated by the automatic transformer.

The measuring devices on the stand are: chrome- kopel thermocouples 1', 2', 3', of L type with individual gradation, voltmeter of Ц4313 type, laboratory ammeter of Э59 type, digital millivoltmeter of Ц300 type. The relative error of strength of current and voltage measurement did not exceed 1,1 % and 2,2 % correspondingly. The error of environment temperatures is 0,075 °C.

The experiments were carried out in two runs .In both cases the concentration of dry substances C_c in the mixture changed from 4 to 14 %, temperature — 20...40 °C. Electric power remained stable during the research. The heat exchange output reduced insignificantly with temperature increase of heating water due thermal losses into the environment (Fig. 2).

The first series of heat exchange research between CHE and the mixture was carried out in the following way. Water was poured into the tank and subsystem II was switched on. The water temperature in the tank was measured as well as temperature of the heating water at the inlet and outlet of the coil heat exchanger. When the liquid inside the tank 1 reached 40 °C subsystem II was switched out. When the liquid in the tank 1 reached the temperature $t = 40$ °C, the subsystem II was switched out. When water reached the temperature of the environment, the first portion of organic matter was added to it in such amount that mass concentration of dry substances be $C_c = 4$ %.

After that the mixture in the tank was mixed by means of the mixer rotating 38...40 r.p.m.. At the same time the subsystem II was switched on and all above mentioned temperatures were fixed. The agitation was done periodically with the interval of 15 minutes. The temperature was measured before each agitation, i.e. in 15 minutes after the previous agitation.

When the temperature of the mixture reached $t_c = 40$ °C the subsystem II was switched off. The mixture was cooled to the temperature of environment $t_{env} t_0$ and dry organic matter was added in the amount enough to increase the dry matter concentration by 2 %. Further research was carried out according to the methodology described above. Thus the concentration reached $C_c = 14$ %.

The series of experiments with the mixture time delay 170 h before the experiment was organized in the following way. The mixture with mass concentration of $C_c = 4$ % was delayed indoors the temperature being 17...24 °C for 170 hours and then it was poured into the tank. The level of tank filling $h = 125$ mm, the height of free mixture surface above the heat exchanger $h_1 = 25$ mm.

Specific heat flow from heating water to the mixture was calculated according to the formula (1).

Value Q_z was determined from the balance equation (2). Total heat output of losses was defined experimentally and calculated

Heat losses of the circulation circuit into the environment, which were determined experimentally, regarding electric power of EH constitute 16...25 %.

The relative error of Q_z calculation was evaluated to be 2,5 %, which is the lowest in comparison with alternative methods.

The discrepancy between the experimental and calculated amount of heat loss from circulation circuit is $\delta' = 2...15$ %.

The coefficient of convective heat exchange to the mixture is determined by the formula (3).

The temperature of the outer heat exchanger wall was taken as the average temperature of heat –transfer agent in the circulation circuit taking into account thermal resistance of the wall and thermal resistance of convective heat exchange from heating water by the dependence (4)).

As a result of processing of a number of experiments it has been estimated that relative error for determining of convective heat exchange coefficients applying the above-mentioned

technique did not exceed 8...10 %.

Fig. 3 shows experimental and calculated results determining convective heat exchange coefficients from CHE heating wall towards organic mixtures with different dry matter concentrations in water and to water under the conditions of constant electric heater power ($Q_E = 96 \text{ Wt}$).

Experimental and calculated data for water almost coincide, points 1 — 2. Convective heat exchange coefficients for water were calculated according to the known criterional dependence (5).

The distinct regularity is observed for the condition $\tau_v < 170 \text{ h}$ and $170 \leq \tau_v \leq 400 \text{ h} — \alpha = f(C_c)$ at $t_c = 20...40 \text{ }^\circ\text{C}$ with the average deviation from averaged value up to 22 % of points 3 and 4 in Fig. 3. But in this case it is possible to assume the dependence $\alpha = f(C_c, \tau_v)$ for organic admixtures of the above mentioned nature.

In the process of research we observed how two-phase system "solid dispersed phase-liquid dispersed environment" gradually turned into three-phase system. In addition the gas phase occurred due to bio-chemical reactions. As it is known from the references [7—10] such mixtures are characterized by tixotropity and polydispersity which leads to forming of two solid particle layers: the upper layer with a crust and the lower sediment one. There is a liquid phase between them. That is why during the experiment we performed periodic mixing in order to create the hanging layer of organic matter.

Fig. 3. shows points 1, 3 — respectively calculated data for water at the temperature 20 and 40 $^\circ\text{C}$ under the condition of free convection and agitation; 2, 4 — experimental data for water at temperature 20 and 40 $^\circ\text{C}$ under the condition of free convection and agitation; 5, 6 — mixture with delay time before the experiment $\tau_v = 0 \text{ h}$ and $\tau_v > 170 \text{ h}$.

According to the graphical dependence (Fig.3) we can conclude that convective heat exchange coefficients to the mixture with the delay time $\tau_v < 170 \text{ h}$ and $170 \leq \tau_v \leq 400 \text{ h}$ before the experiment are 1,7—7,5 time less in comparison with convective heat exchange coefficients to water ($t = 20...40 \text{ }^\circ\text{C}$). The deviation from the average value α to the mixture does not exceed 40 %. The variation in α values can be explained by the fact that the temperature of the mixture during the experiment at $C_c = \text{const}$ changed from 20 to 40 $^\circ\text{C}$, and the temperature head is within $\Delta t = 6...11 \text{ }^\circ\text{C}$ if $C_c = 4...14 \text{ } \%$.

The influence of τ_v expresses itself in the fact that the solid phase during fermentation and heat processing binds the moisture [10], it leads to changing of its size as well as to changing of correlation between volumetric constituting components. But the delay time before the experiment did not have any substantial influence upon the intensity of heat exchange.

Висновки

1. За допомогою створеної експериментальної установки визначено коефіцієнти тепловіддачі до багатокомпонентних органічних середовищ, які відповідають режимам роботи систем біоконверсії.

2. Виявлено, що інтенсивність теплообміну до органічних сумішей з масовими концентраціями $C_c = 4...14 \text{ } \%$ у великому об'ємі за умов вільної конвекції в 1,7...7,5 разів менша ніж до води.

3. Суттєвого впливу часу витримки τ_v на інтенсивність теплообміну не виявлено.

Выводы

1. С помощью созданной экспериментальной установки определены значения коэффициентов теплоотдачи к многокомпонентным органическим средам, которые отвечают режимам работы систем биоконверсии.

2. Выяснено, что интенсивность теплообмена к исследуемым органическим смесям с массовыми концентрациями $C_c = 4...14 \text{ } \%$ в большом объеме для условий свободной конвекции в 1,7...7,5 раз меньше, нежели к воде.

3. Существенного влияния времени выдержки τ_v на интенсивность теплообмена не наблюдается.

Conclusion

1. By means of elaborated experimental unit the values of convective heat exchange coefficients to multi- component organic substances concerning operation conditions of bioconversion systems have been defined.

2. As a result of the research it has been found out that the heat exchange intensity to organic mixtures with mass concentrations of $C_c = 4...14 \text{ } \%$ in larger volume with free convection is 1,7...7,5 times less than to water.

3. Time delay τ_v has shown no substantial influence on the intensity of heat exchange process.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Баадер Б., Доне Е., Брендерфер М. Биогаз: Теория и практика. — М.: Колос, 1982. — 148 с.
2. Гелетуха Г. Г. Современные технологии анаэробного сбраживания биомассы // Экотехнологии и ресурсосбережение — 2002. — № 4. — С. 3—10.
3. Ткаченко С. Й.; Степанов Д. В., Резидент Н. В. Методичні основи моделювання системи термостабілізації реактора біогазової установки // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: Збірник наук. пр. IV Всеукр. наук.-техн. конф. — Вінниця. — 2004. — С. 70—78.
4. Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Резидент Н. В. Залежності для оцінки значень коефіцієнтів тепловіддачі в системах термостабілізації біогазового реактора // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2004. — № 2. — С. 65—70.
5. Платунов Е. С., Буравой С. Е., Курепин В. В. Теплофизические измерения и приборы. — Л.: Машиностроение, 1986. — 256 с.
6. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.
7. Розейнцваг А. К. Структурный анализ механизмов взвешивания частиц в турбулентном потоке сплошной среды жидкостных дисперсных систем // Проблемы энергетики, 2003. — № 9 — 10. — С. 19—34.
8. Антипов А. И., Голубев Л. Г., Мухтаров Я. С. Конвективный теплообмен при течении водонефтяных эмульсий в аппаратах объектов промышленной подготовки нефти // Проблемы энергетики, 2003. — № 1 — 2. — С. 54—59.
9. Урьев Н. Б., Талейсник М. А. Физико-химическая механика и интенсификация образования пищевых масс. — М.: Пищевая промышленность, 1976. — 240 с.
10. Урьев Н. Б., Талейсник М. А. Пищевые дисперсные системы. — М.: Пищевая промышленность, 1985. — 296 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Надійшла до редакції 30.06.05
Рекомендована до опублікування 05.10.05

Ткаченко Станіслав Йосипович — завідувач кафедри, **Резидент Наталія Володимирівна** — аспірантка, **Ларюшкін Євген Павлович** — доцент.

Кафедра теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет

Ткаченко Станіслав Йосифович — заведующий кафедрой, **Резидент Наталья Владимировна** — аспирант, **Ларюшкин Евгений Павлович** — доцент.

Кафедра теплоэнергетики, Винницкий национальный технический университет

Stanislav Tkachenko — Head the Chair, **Natalia Resydent** — Post-Graduate, **Yevgen Lariushkin** — Assistant Professor.

Chair of Head power engineering, Vinnytsia National Technical University