

АНОТАЦІЯ

Сподоба М. О. Електротепломеханічна система біогазового реактора для фермерських господарств. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (14 «Електрична інженерія»). Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2023.

У дисертації проведено дослідження, що мають за мету підвищення енергетичної ефективності процесів інтенсифікації біогазового виробництва шляхом застосування електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату у біогазових реакторах.

Проведено аналіз існуючих методів розрахунку систем перемішування, електричного підігріву та математичних моделей процесу анаеробного зброджування субстрату та систем автоматичного керування технологічними процесами. Виявлено наявні недоліки у системах перемішування та підігріву субстрату. Обґрунтовано доцільність зменшення енергетичних витрат на процеси інтенсифікації анаеробного зброджування шляхом інтеграції процесів перемішування та електричного підігріву субстрату.

Проведені теоретичні дослідження дозволили створити енергоефективну конструкцію електротепломеханічної системи та методи управління процесами перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі.

Визначено раціональні конструктивні особливості електротепломеханічної системи, які забезпечують зниження витрати енергії на підігрів та перемішування.

Розроблено математичну модель, за якою визначено енергетичні витрати для перемішування субстрату у біогазовому реакторі у робочі та пускові моменти руху різних типів механічних мішалок. Проведено порівняльний аналіз тихохідних механічних мішалок. Вибрано раціональний тип механічного перемішуючого пристрою для створення електротепломеханічної системи. Встановлено, що використання двоярусної лопатевої мішалки, у якої по дві лопаті на ярус встановлені під кутом 45° , потребує найменшої кількості енергії на перемішування субстрату та забезпечує утворення ефективно діючих радіальних та осьових потоків у середовищі. Уперше використано 3D моделювання для визначення енергетично ефективного рівня швидкості перемішуючого органу електротепломеханічної системи з точки зору картини траєкторій переміщення елементарних об'ємів та швидкостей потоків субстрату у трьохвимірному просторі. Виявлено закономірність, за якою підвищення частоти обертання зменшує тривалість періоду встановлення усталеного значення робочої потужності. Уперше встановлено, що залежність кількості витраченої енергії на один повний цикл перемішування субстрату при

збільшенні частоти обертання відповідає степеневій функції $P=f(\omega\alpha)$. Визначено частоту обертання, за якої відбувається поєднання раціональних значень потужності перемішуючого пристрою та значення теплового потоку від поверхні нагрівального пристрою.

Використовуючи методи теоретичної теплотехніки, аналітичної математики, розроблено рівняння теплового балансу біогазового реактора за наявності в ньому електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву субстрату. Встановлено, що втрата тепла у навколишнє середовище для різних об'ємів біогазових реакторів, незалежно від температури навколишнього середовища та наявності або відсутності утеплювального шару, має нелінійний характер. Виявлено, що наявність забруднення на стінках біогазового реактора створює додаткову перешкоду для проходження тепла, як з біогазового реактора у навколишнє середовище, так і навпаки. Встановлено, що зі збільшенням частоти обертання електротепломеханічної системи коефіцієнт тепловіддачі та зростання значення теплового потоку мають нелінійний характер, як для нагрівачів із забрудненням поверхні, так і при відсутності забруднень.

Використовуючи диференціальне та інтегральне числення, а також методи теоретичної теплотехніки, аналітичної математики, методи моделювання процесів і технічних систем, розроблено математичну модель, за якою проведено динамічний аналіз витрат енергії на процес термостабілізації об'єму субстрату при підігріві електричним нагрівальним кабелем, що розміщений у лопатях двоярусної лопатевої мішалки. Визначено кількість енергії, необхідної на один цикл підігріву субстрату, його тривалість та зміну температури кожного об'єкту, котрий приймає участь у теплообміні. На основі отриманих залежностей зміни температури субстрату та елементів електротепломеханічної системи уперше було встановлено, що врівноваження температури об'єктів відбувається не однаково, як за наявності перемішування, так і його відсутності. Уперше було встановлено, що енергетично ефективніше використовувати охолодження електротепломеханічної системи підігріву при відсутності перемішування.

Розроблено програму проведення експериментальних досліджень для отримання фактичних результатів динаміки зміни температури субстрату у біогазовому реакторі та величини витраченої енергії на процес підігріву та перемішування субстрату за використання електричного нагрівального кабелю, розміщеного на стінці реактора, та варіанту розміщення його у лопатях двоярусної лопатевої мішалки. Обрано методику обробки масиву зібраних експериментальних даних. Спроектовано та виготовлено діючу фізичну модель біогазового реактора з електротепломеханічною системою для перемішування та підігріву субстрату з метою проведення досліджень

енергоефективності системи підігріву за різних режимів роботи біогазового реактора. Спроектовано та виготовлено рухомі контакти для живлення нагрівального кабелю та датчиків температури розміщених у лопатях мішалки. Синтезовано та виготовлено систему автоматичної реєстрації показань та керування електротепломеханічною системою. Підібрано та змонтовано для збору експериментальних даних високоточне вимірювальне обладнання, яке дає можливість здійснити безперервний збір даних про: зміну температури нагрівального кабелю, лопатей мішалки, стінки реактора, субстрату, біогазу, температури та вологості навколишнього середовища, струму споживання електричним двигуном та нагрівальним кабелем. Спроектовано та виготовлено пристрій для вимірювання концентрації та об'єму утвореного біогазу. Конструкцію пристрою захищено патентом України на корисну модель.

Проведено експериментальні дослідження енергетичної ефективності систем інтенсифікації анаеробного зброджування та отримано наступні результати:

– у період початкового нагріву субстрату до температури зброджування середнє та максимальнє значення температури електричного нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях двоярусної лопатевої мішалки, відповідно на 15 і 12 % більше, а час початкового нагріву субстрату до температури зброджування на 5 % менший, у порівнянні з варіантом розміщення електричного нагрівального кабелю на стінці реактора. Система підігріву, витрачає на 6,6 % менше енергії на початковий нагрів субстрату до температури зброджування при цьому, середнє значення споживаної потужності електричними нагрівачами зменшилося на 1,5 %, а електричний двигун перемішувального пристрою витрачає на 5,3 % менше енергії;

– у порівнянні з варіантом розміщення електричного нагрівального кабелю на стінці реактора тривалість охолодження субстрату при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки на 25,2 % більше, а максимальнє значення температури субстрату на 0,12° С більше, при цьому, тривалість підтримки максимальної температури субстрату на 59,3 % більше. Середнє значення температури нагрівального кабелю на 5,4 % більше, мінімальнє значення на 4,5 % більше. Охолодження кабелю до температури 36,5° С при його розміщенні у лопатях мішалки відбувається на 85,1 % повільніше;

– за одного циклу термостабілізації субстрату середнє та максимальнє значення температури електричного нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях двоярусної лопатевої мішалки, відповідно на 9,5 та 12 % більше, ніж електричного нагрівального кабелю, розміщеного на стінці реактора, при цьому, досягнення максимального значення температури нагрівального кабелю при його розміщенні у лопатях мішалки відбувається на 63,3 % швидше. Мінімальнє значення температури субстрату при використанні

електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву на $0,2^{\circ}\text{C}$ менше, середнє значення на $0,22^{\circ}\text{C}$ більше, максимальне значення більше на $0,2\%$. Досягнення максимального значення температури субстрату відбувається на $20,2\%$ швидше. Тоді як електричний двигун перемішуючого пристрою витрачає на 21% менше енергії на один цикл перемішування субстрату за температури навколишнього середовища 7°C . Тривалість підігріву субстрату до температури $35,8^{\circ}\text{C}$ менше на $20,2\%$, у порівнянні з розміщенням нагрівального кабелю на стінці реактора;

– виявлено, що за використання «раціональної» системи електричного підігріву, вмонтованої у лопаті мішалки, за однаковий період експериментальних досліджень (168 год) утворилося на $6,8\%$ більше біогазу, при цьому вміст метану більше на $3,5\%$, вуглекислого газу менший на 4% , решти газів менший на $8,2\%$, ніж при «класичній» системі електричного підігріву субстрату;

– визначено відхилення між теоретичними та експериментальними даними зміни температури субстрату при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях електротепломеханічної системи за середньою температурою складає $0,1\%$, відхилення за значенням максимальної температури – $0,076\%$. Максимальне відхилення температури субстрату становить $0,29\%$. Відхилення знаходяться у межах похибки вимірювання. Теоретично визначене значення кількості витраченої енергії на процес підігріву субстрату за використання електричного нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях електротепломеханічної системи, складає $W_2=325987,2$ Дж, а кількість витраченої енергії, яка отримана у ході проведення експериментальних досліджень, складає $W_2=310667$ Дж, що на $4,7\%$ менше. Відхилення між теоретичними та експериментальними даними знаходиться у межах нормально допустимого відхилення напруги живлення електричних нагрівачів.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показали, що «раціональна» система – використання електричного нагрівального кабелю, вмонтованого у лопаті лопатевої двоярусної мішалки – є більш енергетично ефективною у порівнянні з «класичною» – електричний нагрівальний кабель розміщено на стінці біогазового реактора. Підвищення енергетичної ефективності відбувається за рахунок зменшення тривалості процесу підігріву, а відповідно, і перемішування субстрату. Відповідна економія за часом для підігріву та перемішування становить від $1,9$ до $20,2\%$; економія енергії для підігріву знаходиться у межах від $8,4$ до $27,2\%$; для перемішування – від $0,3$ до 21% , в залежності від температури навколишнього середовища.

Розраховано річну енергетичну ефективність процесу підігріву та перемішування субстрату у біогазовому реакторі за використання електричного нагрівального кабелю,

вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки, яка складає 18,1 % (219,472 МДж), серед яких 13,1 % (195,072 МДж) – електричний підігрів та 5,0 % (24,4 МДж) – перемішування субстрату.

На основі отриманих результатів досліджень запропоновано методи вдосконалення системи електричного підігріву та перемішування субстрату у біогазовому реакторі, які дають змогу підвищити енергетичну ефективність та підвищити рентабельність біогазового виробництва. Конструкцію електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату у біогазовому реакторі, захищено патентами України на винахід та корисну модель.

Ключові слова: електротепломеханічна система, теплообмін, електричний привід, анаеробне зброджування, енергоефективність, перемішування, субстрат, математична модель.

ANNOTATION

Spodoba M. O. Electrothermomechanical system of a biogas reactor for farms.
Qualifying Scientific Work on Manuscript Rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 «Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics» (14 «Electrical engineering»). National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2023.

In the dissertation, research was conducted with the aim of increasing the energy efficiency of biogas production intensification processes by using an electrothermomechanical system for mixing and heating the substrate in biogas reactors.

The existing methods of calculation of mixing systems, electric heating and mathematical models of the process of anaerobic fermentation of the substrate and systems of automatic control of technological processes were analyzed. Existing shortcomings in the systems of mixing and heating the substrate were revealed. The expediency of reducing energy costs for the processes of intensification of anaerobic fermentation by integrating the processes of mixing and electric heating of the substrate is substantiated.

The conducted theoretical studies made it possible to create an energy-efficient design of an electrothermomechanical system and methods of managing the processes of mixing and electric heating of the substrate in a biogas reactor.

The rational design features of the electrothermomechanical system are defined, which ensure a reduction in energy consumption for heating and mixing.

A mathematical model was developed, according to which the necessary energy costs for mixing the substrate in the biogas reactor during the working and starting moments of movement of various types of mechanical stirrers were determined. A comparative analysis

of low-speed mechanical mixers was carried out. A rational type of mechanical stirring device was chosen to create an electrothermomechanical system. It was established that the use of a two-tier paddle mixer, in which two paddles per tier are installed at an angle of 45° , requires the least amount of energy to mix the substrate and ensures the formation of effectively acting radial and axial flows in the medium. For the first time, 3D modeling was used to determine the energy-efficient speed level of the stirring body of the electrothermomechanical system from the point of view of the picture of the trajectories of the movement of elementary volumes and the speeds of substrate flows in three-dimensional space. A regularity, has been revealed, according to which an increase in the rotation frequency reduces the duration of the period of establishing a stable value of the working power. It was established for the first time that the dependence of the amount of energy spent on one complete cycle of mixing the substrate with an increase in the rotation frequency corresponds to a power function $P=f(\omega\alpha)$. The rotation frequency at which the rational power values of the stirring device and the value of the heat flow from the surface of the heating device is combined is determined.

Using the methods of theoretical heat engineering and analytical mathematics, the equation of the heat balance of the biogas reactor was developed in the presence of an electrothermomechanical system for mixing and electric heating of the substrate. It was established that heat loss to the environment for different volumes of biogas reactors, regardless of the ambient temperature and the presence or absence of an insulating layer, has a non-linear nature. It was found that the presence of contamination on the walls of the biogas reactor creates an additional obstacle for the passage of heat, both from the biogas reactor to the environment and vice versa. It was established that with an increase in the rotation frequency of the electrothermomechanical system, the heat transfer coefficient and the increase in the value of the heat flow have a non-linear nature, both for heaters with surface contamination and in the absence of contamination.

Using differential and integral calculus, as well as methods of theoretical heat engineering, analytical mathematics, methods of modeling processes and technical systems, a mathematical model was developed, according to which a dynamic analysis of energy consumption for the process of thermal stabilization a substrate volume when heated by an electric heating cable placed in the paddles of a two-tier paddle mixer. The amount of energy required for one substrate heating cycle, its duration and the temperature change of each object participating in the heat exchange were determined. Based on the obtained dependences of changes in the temperature of the substrate and elements of the electrothermomechanical system, it was established for the first time that the temperature equilibration of objects does not occur in the same way, both in the presence of mixing and in its absence. For the first time, it was established that it is more energy efficient to use the cooling of the electrothermomechanical heating system in the absence of mixing.

A program of experimental research has been developed to obtain actual results of the dynamics of changes in substrate temperature in a biogas reactor and the amount of energy spent on the process of heating and mixing the substrate using an electric heating cable placed on wall of the reactor and the option of placing it in the paddles of a two-tier paddle mixer. The method of processing the array of collected experimental data was chosen. A functioning physical model of a biogas reactor with an electrothermomechanical system for mixing and heating the substrate was designed and manufactured in order to conduct research on the energy efficiency of the heating system under different operating modes of the biogas reactor. Movable contacts for powering the heating cable and temperature sensors placed in the stirrer paddles were designed and manufactured. A system for automatic registration of readings and control of an electrothermomechanical system was synthesized and manufactured. High-precision measuring equipment was selected and installed for the collection of experimental data, which makes it possible to continuously collect data on the change in temperature of the heating cable, the stirrer paddles, the wall of the reactor, the substrate, biogas, temperature and humidity of the environment, the current consumption of the electric motor and the heating cable. A device for measuring the concentration and volume of the produced biogas was designed and manufactured. The design of the device is protected by a Ukrainian utility model patent.

Experimental studies of the energy efficiency of anaerobic fermentation intensification systems were conducted and the following results were obtained:

– during the initial heating of the substrate to the fermentation temperature, the average and maximum temperature values of the electric heating cable placed in the paddles of the two-tier paddle mixer are 15 and 12 % higher, respectively, and the time of initial heating of the substrate to the fermentation temperature is 5 % shorter compared to the variant placement of the electric heating cable on the reactor wall. The heating system consumes 6,6 % less energy for the initial heating of the substrate to the fermentation temperature, at the same time, the average power consumption of electric heaters has decreased by 1,5 %, and the electric motor of the stirring device consumes 5,3 % less energy;

– compared to the option of placing the electric heating cable on the reactor wall, the duration of substrate cooling when the electric heating cable is placed in the mixer paddles is 25,2 % longer, and the maximum value of the substrate temperature is 0,12° C more, at the same time, the duration of maintaining the maximum temperature of the substrate is 59,3 % longer. The average value of the temperature of the heating cable is 5,4 % higher, the minimum value is 4,5 % higher. Cooling of the cable to a temperature of 36,5° C when it is placed in the stirrer blades is 85,1 % slower;

– during one cycle of thermal stabilization of the substrate, the average and maximum temperature values of the electric heating cable placed in the paddles of the two-tier paddle mixer are 9,5 and 12 % higher, respectively, than the electric heating cable placed on the wall of the reactor, at the same time, reaching the maximum value of the temperature of the heating cable when it is placed in the mixer paddles is 63,3 % faster. The minimum value of the temperature of the substrate when using an electrothermomechanical system for mixing and heating at 0,2° C smaller, the average value is 0,22° C larger, the maximum value is greater by 0,2 %. Reaching the maximum substrate temperature is 20,2 % faster. Whereas, the electric motor of the stirring device spends on 21 % less energy per cycle of mixing the substrate at ambient temperature 7° C. The duration of heating the substrate to a temperature of 35,8° C is 20,2 % less than when the heating cable is placed on the reactor wall;

– it was found that using the "rational" electric heating system installed in the stirrer blade, for the same period of experimental research (168 hours), 6,8 % more biogas was formed, while the methane content was 3,5 % more, carbon dioxide smaller by 4 %, the remaining gases are smaller by 8,2 % than with the «classical» system of electric heating of the substrate;

– the determined deviation between the theoretical and experimental data of the temperature change of the substrate when the electric heating cable is placed in the paddles of the electrothermomechanical system is 0,1 % for the average temperature, and the deviation for the maximum temperature value is 0,076 %. The maximum deviation of the temperature of the substrate is 0,29 %. Deviations are within the measurement error. The theoretically determined value of the amount of energy spent on the process of heating the substrate using an electric heating cable placed in the paddles of the electrothermomechanical system is $W_2=325987,2$ J, and the amount of spent energy obtained during experimental research is $W_2=310667$ J, which is 4,7 % less. The deviation between theoretical and experimental data is within the normal permissible deviation of the supply voltage of electric heaters.

Conducted theoretical and experimental studies have shown that the «rational» system – the use of an electric heating cable mounted in the paddles of a two-tier paddle mixer – is more energy efficient compared to the «classic» one – the electric heating cable is placed on the wall of the biogas reactor. An increase in energy efficiency occurs due to a decrease in the duration of the heating process, and accordingly, the mixing of the substrate. Corresponding savings in time for heating and mixing range from 1,9 to 20,2 %; energy savings for heating range from 8,4 to 27,2 %; for mixing – from 0,3 to 21 %, depending on the ambient temperature.

The annual energy efficiency of the process of heating and mixing the substrate in the biogas reactor using an electric heating cable mounted in the paddle of a two-tier paddle mixer

was calculated, which is 18,1 % (219,472 MJ), where, respectively, 13,1 % (195,072 MJ) is electric heating and 5,0 % (24,4 MJ) is mixing the substrate.

Based on the obtained research results, methods of improving the system of electric heating and mixing of the substrate in the biogas reactor are proposed, which make it possible to increase energy efficiency and increase the profitability of biogas production. The design of an electrothermomechanical system for mixing and heating the substrate in a biogas reactor is protected by patents of Ukraine for an invention and a utility model.

Key words: electrothermomechanical system, heat exchange, electric drive, anaerobic fermentation, energy efficiency, mixing, substrate, mathematical model.