

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

СПОДОБА МИХАЙЛО ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 621.313:621.365:663.033

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА БІОГАЗОВОГО РЕАКТОРА
ДЛЯ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ**

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
14 «Електрична інженерія»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання
на відповідне джерело М. О. Сподоба

Науковий керівник
ЗАБЛОДСЬКИЙ Микола Миколайович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2023

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 $P=f(\omega^a)$. 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

двоюрусної 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 двоюрусної 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:

- в період початкового нагріву субстрату до температури зброджування середнє та максимальне 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 перемішуючого 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 максимальне значення температури субстрату на 0,12 °C більше, при цьому, тривалість підтримки максимальної температури субстрату на 59,3 % більше. Середнє значення температури нагрівального кабелю на 5,4 % більше, мінімальне значення на 4,5 % більше. Охолодження кабелю до температури 36,5 °C при його розміщенні у лопатях мішалки відбувається на 85,1 % повільніше;

- за одного циклу термостабілізації субстрату середнє та максимальне 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. Мінімальне значення температури субстрату при використанні електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву на 0,2 °C менше, середнє значення на 0,22 °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 °С. Тривалість підігріву субстрату до температури 35,8 °С 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 розміщені 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.

ABSTRACT

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 $P=f(\omega^a)$. 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.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Zablodskiy M., **Spodoba M.** Numerical study of energy losses in the environment for mesophilic fermentation regime. Energy and Automation. 2020. № 4.

Р. 97–108. *(Здобувачем проведено дослідження для визначення необхідної кількості енергії на поновлення величини теплових втрат у навколишнє середовище, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

2. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.** Обґрунтування створення електротепломеханічної системи перемішування та підігріву біомаси. Енергетика та автоматика. 2020. № 5. С. 136–148. *(Здобувачем проведено дослідження зміни теплового потоку від частоти обертання робочого органу електротепломеханічної системи, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

3. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.** Визначення енергетично ефективного рівня швидкості перемішувального органу електромеханічної системи. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2020. Вип. 4. № 52. С. 17–26. *(Здобувачем проведено 3D моделювання та визначено вектори розповсюдження потоків біомаси в залежності від швидкості обертання лопатевої двоярусної мішалки, визначено енергетично ефективний рівень швидкості перемішувального органу електротепломеханічної системи, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

4. **Сподоба М. О.**, Заблодський М. М. Залежність енергетичних витрат від типу використаної механічної мішалки у біогазовому реакторі. Електротехніка та електроенергетика. 2021. Вип. 1. С. 26–33. *(Здобувачем проведено дослідження залежності енергетичних витрат механічних мішалок, визначено енергоефективний тип перемішуючого пристрою для підвищення енергетичної ефективності процесу перемішування субстрату у біогазовому реакторі, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

5. Zablodskiy M. M., **Spodoba M. O.** Power supply of measuring sensors when performing experimental studies of electrical thermal mechanical system. Energy and Automation. 2021. № 4. Р. 39–48. *(Здобувачем проведено експериментальне дослідження колювання вихідної напруги блоків живлення для контрольно-вимірювального обладнання, зроблено висновки і підготовлено статтю до друку).*

6. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.**, Сподоба О. О. Експериментальне дослідження витрати енергії на процес початкового нагріву субстрату за використання електротепломеханічної системи. *Electrical Engineering and Power Engineering*. 2022. Вип. 1. С. 49–59. *(Здобувачем проведено експериментальне дослідження витрат енергії на початковий нагрів субстрату за використання електротепломеханічної системи, зроблено висновки, подано статтю до друку).*

7. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.**, Сподоба О. О. Експериментальне дослідження енергетичних втрат біогазового реактора в навколишнє середовище при мезофільному режимі зброджування. *Енергетика і автоматика*. 2022. № 2. С. 18–32. *(Здобувачем проведено експериментальне дослідження залежностей енергетичних втрат біореактора у навколишнє середовище при мезофільному режимі зброджування, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

**Стаття у науковому виданні іншої держави,
включеному до міжнародних наукометричних баз даних
Scopus та/або Web of Science Core Collection**

8. Заблодский Н. Н., **Сподоба М. А.**, Сподоба А. А. Экспериментальное исследование затрат энергии на процесс первоначального нагрева субстрата до температуры брожения. *Problemele Energeticii Regionale*. 2022. № 1. Вип. 53. С. 83–96. *(Здобувачем проведено експериментальне дослідження залежностей витрат енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

**Публікації у матеріалах наукових конференцій,
включених до міжнародних наукометричних бази даних
Scopus та/або Web of Science Core Collection**

9. Zablodskiy M., **Spodoba M.** Mathematical Model of Thermal Processes During the Fermentation of Biomass in a Biogas Reactor. 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020. P. 227–231. *(Здобувачем проведено дослідження впливу забруднюючого шару нагрівальної поверхні електротепломеханічної системи на процес тепловіддачі та кількості*

енергетичних витрат на підігрів субстрату у біогазовому реакторі, зроблено висновки та підготовлено публікацію до друку).

10. Zablodskiy M., Kozyrskyi V., Zhyltsov A., Savchenko V., Sinyavsky O., **Spodoba M.**, Klendiy P. Klendiy G. Electrochemical Characteristics of the Substrate based on Animal Excrement During Methanogenesis with the Influence of a Magnetic Field. In 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2020. P. 530–535. *(Здобувачем проведено дослідження електрохімічних характеристик субстрату на основі екскрементів тварин під час метаногенезу під впливом магнітного поля, зроблено висновки та підготовлено публікацію до друку).*

11. Zablodskiy M., **Spodoba M.** Dynamic Analysis of Energy Consumption During Substrate Fermentation in a Biogas Reactor. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2021. P. 147–152. *(Здобувачем побудовано математичну модель та проведено дослідження динаміки зміни енергетичних витрат на процеси термостабілізації об'єму субстрату при використанні електротепломеханічної системи, зроблено висновки та підготовлено публікацію до друку).*

12. Zablodskiy M., **Spodoba M.** Comparison of Theoretical and Experimental Data of Energy Consumption when Heating the Substrate in a Biogas Reactor. In 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). 2022. P. 01–04. *(Здобувачем проведено порівняння теоретичних та експериментальних даних енерговитрат при нагріванні субстрату в біогазовому реакторі, зроблено висновки та підготовлено публікацію до друку).*

Патенти України на винахід та корисні моделі

13. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.**, Сподоба О. О. Біогазовий реактор: патент на корисну модель № 145242 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 101/00. u 202004181. Заявлено 08.07.2020. Опубліковано 25.11.2020. Бюл. № 22. 5 с. *(Здобувачем проведено патентний пошук, здійснено порівняльний аналіз існуючих аналогів, узагальнено та систематизовано результати, підготовлено заявку на патент).*

14. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.**, Сподоба О. О. Пристрій для визначення об'єму утвореного у біогазових реакторах біогазу: патент на корисну модель № 147391 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 101/00. u 202007103. Заявлено 05.11.2020. Опубліковано 05.05.2021. Бюл. № 18. 5 с. *(Здобувачем проведено патентний пошук, здійснено порівняльний аналіз існуючих аналогів, узагальнено та систематизовано результати, підготовлено заявку на патент).*

15. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.**, Сподоба О. О. Біогазовий реактор: патент на винахід № 126250 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 3/28. a 202004191. Заявлено 08.07.2020. Опубліковано 07.09.2022. Бюл. № 36. 5 с. *(Здобувачем проведено патентний пошук, здійснено порівняльний аналіз існуючих аналогів, узагальнено та систематизовано результати, підготовлено заявку на патент).*

Тези наукових доповідей

16. **Сподоба М. О.**, Заблодський М. М., Радько І. П. Основні складові методології побудови заглибного електромеханічного перетворювача для біогазових комплексів. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: V Міжнародна науково-практична конференція, присвячена пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова, м. Київ, 19 грудня 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. С. 67–68. *(Здобувачем вивчено питання побудови заглибного електромеханічного перетворювача для біогазових реакторів, узагальнено та систематизовано результати).*

17. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.** Методика проведення експериментальних досліджень біогазового реактора з заглибною комбінованою системою перемішування та електричного підігріву. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природо-користування (теорія, практика, історія, освіта): IX Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 19–22 травня 2020 року: тези доповіді. Київ, 2020. С. 99–100. *(Здобувачем вивчено питання методики проведення експериментальних досліджень).*

18. Zablodskiy M. M., **Spodoba M. O.** Improvement of the method for determining energy consumption in a biogas reactor. Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials (ICEPOM-12): XII International Conference, June 01–05,

2020. Р. 311. *(Здобувачем проведено аналіз та удосконалено метод визначення енерговитрат у біореакторі).*

19. Заблодський М. М., Шворов С. А., Клендій П. Б., Андрієвський А. П., Ковальчук С. І., **Сподоба М. О.** Інноваційна система переробки побічних продуктів птахівництва з впливом електромагнітного поля і автономним енергозабезпеченням. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: 6-й Міжнародний конгрес, м. Львів, 23–25 вересня 2020 року: тези доповіді. Львів, 2020. С. 134. *(Здобувачем розглянуто питання автономного енергозабезпечення інноваційної системи переробки побічних продуктів птахівництва).*

20. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.** Обґрунтування створення електротепло-механічної системи перемішування та підігріву біомаси. Проблеми сучасної теплоенергетики: Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 100-річчю професора Бориса Харлампієвича Драганова, м. Київ, 10–11 грудня 2020 року: тези доповіді. Київ, 2020. С. 133–134. *(Здобувачем обґрунтовано створення електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату у біореакторі).*

21. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.** Безперервна реєстрація даних при експериментальних дослідженнях електротепломеханічної системи біогазового реактора. Сучасні проблеми землеробської механіки: XXIII Міжнародна наукова конференція, присвячена 122-річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, м. Київ – м. Житомир, 16–18 жовтня 2022 року: тези доповіді. Київ, 2022. С. 223–226. *(Здобувачем проведено аналіз та розглянуто питання створення системи безперервної реєстрації даних при експериментальних дослідженнях електротепломеханічної системи біогазового реактора, узагальнено та систематизовано результати).*

22. **Сподоба М. О.**, Заблодський М. М. Перспективи використання біогазових технологій для утилізації органічних відходів. Екологічно сталий розвиток урбосистем: Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція, м. Харків, 2–3 листопада 2022 року: тези доповіді. Харків, 2022. С. 111.

(Здобувачем розглянуто питання перспектив використання біогазових технологій для утилізації органічних відходів).

23. **Сподоба М. О.**, Заблудський М. М. Енергоефективність електроприводу змішуючого пристрою біогазового реактора. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: Міжнародна науково-практична конференція, м. Харків, 22 грудня 2022 року: тези доповіді. Харків, 2022. С. 70–71. *(Здобувачем проведено аналіз та розглянуто питання енергоефективності електроприводу змішуючого пристрою для біогазового реактора, узагальнено та систематизовано результати).*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК У ПРОМИСЛОВОСТІ ТА СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ.....	31
1.1. Стан розвитку біогазових технологій в світі.....	31
1.1.1. Відходи тваринництва та рослинництва у сільському господарстві.....	36
1.2. Огляд конструктивних та технологічних параметрів біогазових установок.....	40
1.2.1. Будова резервуарів біогазових установок.....	41
1.2.2. Огляд конструкцій перемішуючих пристроїв у біогазових реакторах.....	52
1.2.3. Огляд існуючих способів нагріву субстрату в біогазовому реакторі.....	69
1.3. Математичне моделювання процесів метанового бродіння.....	74
1.4. Огляд існуючих систем автоматичного керування перемішуванням та підігрівом субстрату.....	77
Висновки та завдання досліджень.....	81
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ЗАГЛИБНОЇ ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ ТА ПІДІГРІВУ СУБСТРАТУ.....	83
2.1. Основні положення.....	83
2.2. Визначення енергетичних витрат, необхідних для перемішування субстрату у біогазовому реакторі.....	84
2.2.1. Порівняльний аналіз енергетичних витрат від типу використаної механічної мішалки.....	91
2.2.2. Визначення енергетично ефективного рівня швидкості перемішувального органу електромеханічної системи.....	94

2.3.	Рівняння теплового балансу при анаеробному зброджуванні органічного субстрату у біогазовому реакторі.....	102
2.3.1.	Дослідження зміни величини втрат тепла у навколишнє середовище.....	108
2.3.2.	Дослідження зміни теплового потоку від частоти перемішування та наявності осаду на нагрівачі.....	112
2.4.	Динамічний аналіз енергетичних витрат під час підігріву субстрату у біогазовому реакторі.....	119
	Динамічний аналіз енергетичних витрат під час підігріву субстрату електричним підігрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора.....	119
2.4.1.	Динамічний аналіз енергетичних витрат під час підігріву субстрату електричним підігрівачем розміщеним у лопатях двоярусної лопатевої мішалки.....	135
2.4.2.	Висновки до другого розділу.....	151
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ ТА ПІДІГРІВУ СУБСТРАТУ.....		154
3.1.	Обґрунтування вибору методу експериментальних досліджень....	154
3.2.	Програма експериментальних досліджень.....	156
3.3.	Опис експериментальної біогазової установки.....	157
3.4.	Вимірювальне обладнання для проведення експериментальних досліджень на фізичній моделі біогазового реактора.....	163
3.5.	Автоматичне керування електротепломеханічною системою та зчитування інформації з вимірювального обладнання.....	170
3.6.	Планування експериментальних досліджень на фізичній моделі біогазового реактора з класичною та раціональною системою підігріву.....	176
	Висновки до третього розділу.....	178

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	180
4.1. Процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування.....	180
4.2. Тривалість теплових втрат у навколишнє середовище для одного циклу охолодження субстрату.....	189
4.3. Експериментальне дослідження енергетичних витрат під час одного циклу термостабілізації субстрату.....	194
4.4. Порівняння теоретичних та експериментальних даних при підігріві та перемішуванні субстрату у біогазовому реакторі.....	205
Висновки до четвертого розділу.....	207
РОЗДІЛ 5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ У БІОГАЗОВОМУ РЕАКТОРІ.....	210
Запропонована електротепломеханічна система для	
5.1. перемішування та підігріву органічної сировини у біогазовому реакторі.....	210
5.2. Запропонована методика визначення виробленого об'єму біогазу..	213
Підвищення енергетичної ефективності роботи біогазового реактора з електротепломеханічною системою за рахунок	
5.3. зменшення витрати енергії на процеси перемішування та підігріву субстрату.....	218
Висновки до п'ятого розділу.....	221
ВИСНОВКИ.....	222
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	227
ДОДАТКИ.....	245

ВСТУП

Біогазові технології відіграють одну з важливих ролей у формуванні сучасної енергетичної системи, через що, увага до їх енергетичної ефективності підвищена.

Збільшення фермерських та сільськогосподарських угідь, разом зі зростанням поголів'я тварин призводить до накопичення рослинних та тваринних відходів – біомаси. Це підштовхує населення на пошуки альтернативних методів утилізації та переробки отриманих відходів, оскільки системи збереження є джерелами небезпечних викидів метану та окисів азоту. Така ситуація призводить до забруднення повітря та посилення кліматичних змін та парникового ефекту. Найбільшого розповсюдження для утилізації побутових та промислових відходів, каналізаційних стічних вод отримала аеробна та анаеробна обробка у спеціальних резервуарах – біогазових реакторах.

Актуальність теми. На сьогоднішній день зброджування органічних відходів у біогазових установках є одним з найпрогресивніших, екологічно та економічно вигідних рішень для отримання енергії з відходів у вигляді біогазу. Поряд з цим, побічним ефектом анаеробного зброджування органічних відходів є отримання екологічно чистих добрив.

Використовуючи анаеробну обробку з органічних відходів можна отримати біогаз. Провести його очищення та отримати біометан, який може замінити природний газ для використання як у власних потребах так і вироблення теплової та електричної енергії у когенераційних установках.

Рентабельність використання біогазових установок безпосередньо залежить від енергоефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування, тому при виборі типу перемішуючого та нагрівального пристроїв особливу увагу приділяють енергетичним витратам, які залежать від багатьох умов. Через, що у світі відбувається безліч наукових досліджень у напрямку створення енергетично ефективних типів перемішування та підігріву органічних відходів у біогазових реакторах.

Україна та інші країни світу володіють необхідними для синтезу біогазу

сільськогосподарськими та природними ресурсами, однак через відсутність поглиблених теоретичних та експериментальних досліджень технологічних та енергетичних аспектів впливу процесів перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі направлених на зниження енергетичних витрат, відбувається гальмування створення нових енергетично ефективних конструкцій для перемішування та підігріву субстрату у біогазових реакторах. Тому, дослідження технологічних та енергетичних аспектів впливу процесів перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі на зниження енергетичних витрат, для створення енергетично ефективної конструкції для перемішування та забезпечення рівномірного температурного режиму анаеробного зброджування субстрату в біогазовому реакторі є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота була виконана згідно з науково-дослідною тематикою кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій Національного університету біоресурсів і природокористування України при виконанні держбюджетних тем «Розробка електротехнологічного комплексу з гібридною системою енергозабезпечення для переробки побічних продуктів птахівництва у паливо, біологічні корми та добрива» (номер державної реєстрації 0120U102105, 2020–2022 рр.) та «Науково-технічні основи створення комплексу енерготехнологічної переробки біомаси для отримання речовин з новими властивостями і підвищення їх комерційної цінності» (номер державної реєстрації 0121U113746, 2021 рр.), у яких здобувач був співвиконавцем.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є підвищення енергетичної ефективності процесів інтенсифікації біогазового виробництва шляхом застосування електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату у біогазових реакторах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести огляд наукових робіт у напрямку зменшення енергетичних витрат на процеси перемішування та електричного підігріву субстрату у

біогазовому реакторі;

- обґрунтувати доцільність зменшення енергетичних витрат на процеси перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі за рахунок поєднання їх у електротепломеханічну систему;

- побудувати математичну модель динаміки зміни енергетичних витрат на процеси термостабілізації об'єму субстрату у біогазовому реакторі, при підігріві електричним нагрівальним кабелем розміщеним у лопатях двоярусної лопатевої мішалки;

- проаналізувати типи механічних перемішуючих пристроїв та обрати енергетично ефективну конструкцію мішалки для створення комбінованої електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву субстрату;

- проаналізувати картини траєкторій переміщення елементарних об'ємів, швидкостей потоків субстрату у трьохвимірному просторі;

- визначити енергетично ефективний рівень швидкості перемішуючого органу електротепломеханічної системи, що забезпечує раціональні траєкторії переміщення елементарних об'ємів швидкостей потоків субстрату, значення теплових потоків і коефіцієнтів тепловіддачі;

- розробити, виготовити та випробувати експериментальний зразок біогазового реактора з електротепломеханічною системою для перемішування та підігріву субстрату;

- визначити експериментальним шляхом енергетичні характеристики електротепломеханічної системи за різного значення температури навколишнього середовища. Дослідити час охолодження субстрату та об'єктів у біогазовому реакторі;

- розробити рекомендації щодо реалізації процесів інтенсифікації анаеробного зброджування у біогазовому реакторі з використанням електротепломеханічної системи підігріву та перемішування.

Об'єкт дослідження – фізичні, енергетичні та технологічні процеси у біогазових реакторах.

Предмет дослідження – закономірності зміни енергетичних витрат на процеси інтенсифікації біогазового виробництва при застосуванні електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату у біогазових реакторах.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базуються на проведенні математичного моделювання з використанням методів теоретичної теплотехніки, аналітичної математики, методів моделювання процесів і технічних систем та диференціального і інтегрального числення. Обробка отриманих даних та перевірка адекватності прийнятих моделей здійснювалась на основі проведених експериментальних досліджень з використанням прикладних комп'ютерних програм. Експериментальні дослідження проводилися на спеціально розробленому експериментальному зразку установки біогазового реактора з електротепломеханічною системою із використанням стандартних, сконструйованих та виготовлених елементів.

Достовірність результатів проведеного дослідження, висновків та рекомендацій, що викладені в дисертації. Наукові положення та висновки, сформульовані в дисертаційній роботі, належним чином обґрунтовані. Достовірність результатів дослідження підтверджена аналізом енергетичних витрат на процеси перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі на спеціально розробленій експериментальній установці.

Наукова новизна отриманих результатів. Отримали подальший розвиток в напрямку узагальнення та уніфікації теоретичні основи визначення пускової та робочої потужності електропривода системи перемішування, що на відміну від існуючих, враховують поправочні коефіцієнти критерія Ейлера, степеневу функцію залежності витраченої енергії при збільшенні частоти обертання робочого органу мішалки та енергетичні витрати у замкнених об'ємах, зумовлені появою зустрічних потоків субстрату біогазового реактора.

Вперше розроблено математичну модель для динамічного аналізу процесу термостабілізації та витрат енергії електротепломеханічної системи на перемішування та електричний підігрів субстрату у біогазовому реакторі, з

урахуванням регулювання потужності електричного нагрівального кабелю, його розміщення у лопатях двоярусної лопатевої мішалки та тривалості охолодження.

Удосконалено статичну математичну модель теплового балансу біогазового реактора за наявності в ньому електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву субстрату; в якій враховано величину теплової енергії, вивільненої під час охолодження нагрівального пристрою вмонтованого у лопаті та вал механічної лопатевої мішалки.

Вперше визначені основні закономірності зміни витрати електричної потужності та теплового потоку від частоти обертання валу електричного двигуна електротепломеханічної системи для покриття теплових втрат у навколишнє середовище при мезофільному температурному режимі зброджування за різних температур навколишнього середовища та різних об'ємів біогазових реакторів з урахуванням постійних забруднень внутрішніх стінок, наявності осаду на нагрівачах, при відсутності та наявності утепленого шару.

Удосконалено 3D модель для аналізу динаміки матеріальних потоків субстрату біогазового реактора і визначення енергетично ефективного рівня швидкості перемішуючого органу електротепломеханічної системи, що відрізняється врахуванням закономірності зменшення тривалості періоду встановлення усталеного значення робочої потужності при підвищенні частоти обертання валу електричного двигуна перемішувального органу, яка дозволяє виконати оцінку енергокерованості в режимах забезпечення штучно створених параметрів мікроклімату і раціональних умов для протікання процесу метаноутворення у біогазових технологіях.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено науково-обґрунтовану інженерну методику розрахунку фактичних результатів динаміки зміни температури субстрату у біогазовому реакторі та величини витраченої електричної енергії на процеси підігріву та перемішування субстрату за використання електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки.

Обґрунтовано конструктивні параметри електротепломеханічної системи

для перемішування та підігріву субстрату у біогазовому реакторі, які забезпечують зниження енергетичних витрат на процеси інтенсифікації біогазового виробництва. Конструкцію електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату у біогазовому реакторі, захищено патентами України на винахід та корисну модель.

Запропоновано пристрій для визначення об'єму утвореного у біогазових реакторах біогазу, а також визначення у біогазі вмісту та концентрації газів. Конструкцію пристрою для визначення об'єму біогазу захищено патентом України на корисну модель.

Створено експериментальний зразок біогазового реактора з електротепломеханічною системою для фермерських та сімейних господарств. Розроблено систему безперервного контролю та реєстрації інформації при проведенні експериментальних досліджень дослідних зразків біогазових реакторів з електротепломеханічною системою.

Розроблені рекомендації для реалізації процесів інтенсифікації метаноутворення у біогазовому реакторі на основі впровадження запропонованої електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву субстрату.

Встановлено, що використання електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті лопатевої двоярусної мішалки дозволяє підвищити енергетичну ефективність за рахунок зменшення тривалості процесу підігріву, а відповідно і перемішування субстрату, економія по часу 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.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертаційної роботи виконанні здобувачем особисто, зокрема: проаналізовано зміст публікацій за обраною тематикою, проведено аналіз конструкцій біогазових реакторів, перемішуючих та підігрівальних пристроїв, режимів їхньої роботи, способів керування, виявлено проблеми та поставлені задачі дослідження; розроблено методичні засади побудови заглибного електромеханічного перетворювача для біогазових реакторів [1]; проведено аналіз та удосконалення методу визначення енергетичних витрат у біогазовому реакторі [2]; проведено дослідження для визначення необхідної кількості енергії на поновлення величини теплових втрат у навколишнє середовище [3]; проведено дослідження зміни теплового потоку від частоти обертання робочого органу електротепломеханічної системи [4, 5]; досліджено вплив забруднюючого шару нагрівальної поверхні електротепломеханічної системи на процес тепловіддачі та кількості енергетичних витрат на підігрів субстрату у біогазовому реакторі [6]; проведено 3D моделювання та визначено вектори розповсюдження потоків біомаси в залежності від швидкості обертання лопатевої двоярусної мішалки, визначено енергетично ефективний рівень швидкості перемішувального органу електротепломеханічної системи [7]; проведено дослідження залежності енергетичних витрат механічних мішалок, визначено енергоефективний тип перемішуючого пристрою для підвищення енергетичної ефективності процесу перемішування субстрату у біогазовому реакторі [8]; побудовано математичну модель динаміки зміни енергетичних витрат на процеси термостабілізації об'єму субстрату при підігріві електричним нагрівальним кабелем розміщеним у лопатях двоярусної мішалки [9]; розроблено конструкцію електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату у біогазовому реакторі [10, 11]; розроблено пристрій для вимірювання утвореного у біогазових реакторах об'єму біогазу, а також визначення у ньому вмісту та концентрації газів [12]; проведено дослідження та розроблено систему безперервної реєстрації даних при проведенні експериментальних досліджень енергоефективності електротепломеханічної системи біогазового реактора [13, 14]; розглянуто питання автономного

енергозабезпечення системи переробки побічних продуктів птахівництва [15]; розроблено фізичну модель біогазового реактора з електротепломеханічною системою для перемішування та підігріву субстрату на якій проведено експериментальні дослідження кількості витраченої енергії на процеси перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі, за різного значення температури навколишнього середовища [16, 17, 18, 19]; проведено дослідження електрохімічних характеристик субстрату на основі екскрементів тварин під час метаногенезу під впливом магнітного поля [20]; проведено порівняння теоретичних та експериментальних даних енерговитрат при нагріванні субстрату в біогазовому реакторі [21]; проведено аналіз та розглянуто питання енергоефективності електроприводу змішуючого пристрою для біогазового реактора [22]; проведено аналіз та розглянуто питання перспектив використання біогазових технологій для утилізації органічних відходів [23].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались на: V Міжнародній науково-практичній конференції присвяченій пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», (2019 р., м. Київ); IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), (2020 р., м Київ); IX Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)», (2020 р., м. Київ); XII International Conference “Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials” ICEROM-12, (2020 р., м. Кам'янець-Подільськ); 6-й Міжнародний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. енергоощадність. збалансоване природокористування», (2020 р., м. Львів); IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), (2020 р., м. Харків); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сучасної теплоенергетики» присвячена 100-річчю професора Бориса Харлампієвича Драганова, (2020 р. м. Київ); IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), (2021 р., м. Харків); XXIII Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської

механіки" присвяченій 122-річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, (2022 р., м. Київ – Житомир); IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES) (2022 р. Кременчуг); Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Екологічно сталий розвиток урбосистем» До дня пам'яті доктора технічних наук, професора Стольберга Фелікса Володимировича (2–3 листопада 2022 р., м. Харків); Міжнародна науково-практична конференція Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК (22 грудня 2022 р., м. Харків).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 23 наукові праці, з яких 7 статей у наукових фахових виданнях України, 1 у закордонному науковому виданні, що входить до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 4 публікації в матеріалах конференцій, що входять до наукометричної бази даних Scopus та Web of Science, 8 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях, 2 патенти України на корисні моделі та 1 патент України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 361 сторінку. Дисертація містить 110 ілюстрацій, 5 таблиць, список використаних джерел із 178 найменувань.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК У ПРОМИСЛОВОСТІ ТА СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

1.1 Стан розвитку біогазових технологій в світі

Дослідженню стану розвитку біогазових технологій та перспективам впровадження альтернативної енергетики присвячено ряд робіт вітчизняних та зарубіжних вчених, а саме: J. Brian, S. R. Medipally, O. Prutska, . L. Grando, S. Lohan, Azeem Hafiz, M. Shivika, E. O. Ahlgren, P. R. Shukla, K. B. Гаценко, М. Д. Волошин, П. Б. Клендій, П. П. Кучерук, Ю. В. Куріс, Ю. В. Охота, К. В. Козак, М. В. Панчук, Л. С. Шлапак, Д. М. Токарчук, О. В. Яремчук, Г. С. Трипольська, О. А. Дячук, Р. З. Подолець, М. Г. Чепелєв, Г. О. Четверик, М. М. Заблодський та інші [24 – 49]. Вагомим внеском є дослідження J. Brian, L. Vimmerstedt та інші, які розробили детальну модель динаміки виробництва біопалива [24]. M. Shariff, S. R. Medipally та інші наголошують на вагомості розвитку альтернативної енергетики під час глобалізації [25]. О. Prutska, E. Kirieieva та інші у праці [26] дають прогноз щодо розвитку біогазових технологій в Україні. R. L. Grando, S. Lohan, Azeem Hafiz, M. Shivika проводять детальний аналіз розвитку процесу переробки відходів у біогазових реакторах у країнах Європейського Союзу та Індії [27 – 30].

Німеччина лідирує у світі в галузі промислового біогазу. Сприяє розвитку відновлювальної енергетики у Німеччині, закон про відновлювані джерела енергії (ЕЕГ), що з'явився у 2000 році [31]

Українські вчені Г. Гелетуха, А. Баштовий вивчають екологічні, соціально-економічні та енергетичні переваги впровадження та використання біогазових технологій в Україні [43]. А. Blotskiy та інші [44] провівши дослідження стверджують у необхідності державної підтримки у галуззі альтернативної енергетики. У праці [45] обґрунтовано необхідність розвитку біогазових технологій в Україні, це створить умову економити природні ресурси та кошти. О. Климчук [46] проводив аналіз історичного розвитку біогазових технологій та

наводить основні причини, які стримують їх розвиток в Україні.

Особливу увагу все більше привертає дослідження біогазових установок періодичної та безперервної дії [47]. У періодично діючих установках, авторами [48] було встановлено певну залежність між добовою дозою завантаження та кількістю виробленого біогазу. Однак, через відсутність експериментальних залежностей через відмінність у конструкціях реакторів, характеристик анаеробного зброджування обумовлює потребу у проведенні додаткових досліджень у цій області.

Авторами [49] розглянуто основні вимоги до конструкції біогазових установок, технологічні схеми та методи розрахунку і вибір необхідного обладнання, наведено шляхи використання відходів метанового бродіння, запропонована методика економічної та екологічної оцінки використання біогазових технологій, розглянуто вплив факторів на виробництво біогазу.

Перша з працюючих біогазових установок промислового типу була побудована на свинофермі комбінату «Запоріжсталь» у 1993 році. Після чого були запуснені біогазові установки компаній «Еліта», «Агро-Овен», «Українська молочна компанія» та інші.

Певний досвід розробок біогазових установок в Україні мають компанії УкрНДІагропроект, Стелком, Альтек та інші. Компанії мають проектно-технічну документацію біогазових установок, але нажалі з фінансових причин не отримали дозвіл на впровадження установок у будівництво.

Біогазова установка на комбінаті «Запоріжсталь» була побудована з метою очищення стічних вод та зменшити власне споживання електричної енергії підприємством. На сьогоднішній день, біогазова установка працює для покриття власних потреб у тепловій енергії.

Біогазова установка корпорації «Агро-Овен» запущена в 2003 році в с. Оленівка Магдалинівського району Дніпропетровської області за підтримки уряду Нідерландів (рис.1.1) працює також для покривання власних потреб у енергії свиногокомплексу. Постачанням обладнання займалась компанія BTG, монтаж та проектні роботи УкрНДІагропроект та BTG. Установка призначена для

обробки 80т/добу гною від свиноферми, річна продуктивність біогазу 1,2 млн. куб. метрів, потужність – 160/320 кВт (електрична та теплова).



Рис. 1.1. Загальний вигляд біогазової установки у с. Оленівка.

Експлуатація біогазової установки компанії «Еліта» була призупинена ще у 2011 році, зупинка була пов'язана з нерентабельністю роботи. Біогазова установка на фермі великої рогатої худоби «Української молочної компанії» підключена до електричної мережі і виробляє електричну енергію за зеленим тарифом. Згідно з даними НАЕР існують БГУ в Хмельницькій (с. Мокіївці, ТОВ "Спецгазремтехнологія") та Львівській областях (с. Батятичі, ТОВ "Західно-Українські газові технології"), запущені в експлуатацію в лютому 2011 року потужністю 1 МВт кожна, проте достовірні дані про їх експлуатації відсутні.

Також експлуатують й інші біогазові установки, в с. В. Крупіль (рис. 1.2) працює біогазові установка потужністю 500/800 кВт (електрична та теплова), продуктивність в рік складає 2,2 млн. куб. метрів, а також, біогазова установка в смт. Терезино, продуктивністю 2 млн. куб. метрів та потужністю 450/720 кВт (електрична та теплова).



Рис. 1.2. Загальний вигляд біогазової установки у с. В. Крупіль.

На весні 2012 році «Миронівський хлібопродукт» почав роботи з будівництва першої біогазової станції на птахофабриці «Оріль-лідер» у Дніпропетровській області. В грудні того ж року компанія ввела в експлуатацію перший ферментатор. У 2013 році була запущена вся біогазова станція (рис. 1.3), потужність якої склала 5 МВт/год.



Рис. 1.3. Загальний вигляд будівництва першої біогазової станції на птахофабриці «Оріль-лідер» у Дніпропетровській області

Це перша у Європі біогазові станція такої потужності та рівня технологічного оснащення, яка працює на курячому посліді та відходах

комплексу.

Таким чином, більшість впроваджених технологій біогазового виробництва є власністю монополістів агропромислового комплексу, які володіють великою кількістю необхідних ресурсів та фінансовою незалежністю в умовах слабого фінансування розробок та впровадження альтернативних джерел енергії.

Внаслідок великого розповсюдження приватних будинків, а питання вивезення, збереження та утилізації відходів стоїть дуже гостро, широкого розповсюдження набувають малі (сімейні) біогазові установки (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Сімейна біогазова установка

Ряд країн Азії та Африки розпочали масові кампанії з популяризації біогазу технології через державну підтримку та міжнародну допомогу [50, 51]. У Індії, В'єтнамі, Китаї та багатьох інших країнах будують сімейні біогазові установки [52 – 54], отриманий у них біогаз використовують для приготування їжі, а відпрацьований субстрат у якості добрив для присадибних ділянок. У Китаї, на кінець 1990-х років, було збудовано близько 10 мільйонів сімейних біогазових установок, вони забезпечували виробництво близько 7 млрд. м³ біогазу на рік, що забезпечувало 60 мільйонів людей біогазом. В кінці 2010 року у Китаї вже працювало близько 40 млн біогазових установок і з кожним роком їх кількість зростає [55, 56]. У Індії встановлено понад 4 млн сімейних біогазових установок. У Непалі існує програма підтримки розвитку біогазових технологій, завдяки чому, у цій країні вже створено та введено в експлуатацію понад 200 тисяч сімейних біогазових установок [55, 56].

Зважаючи на такий попит та стрімкий розвиток проектування і виробництва малих (сімейних) біогазових установок, можна стверджувати, що це питання є надзвичайно актуальним у наш час.

1.1.1. Відходи тваринництва та рослинництва у сільському господарстві

Сьогодні потреба людства в енергетичних ресурсах щороку збільшується, висока вартість сировини (нафти, газу, палива) призводить до необхідності пошуку альтернативних джерел енергії. Сільське господарство є галуззю, яка містить різноманітні цінні енергетичні компоненти у вигляді органічних відходів [57 – 59]. Кожного року у тваринництві та рослинництві накопичуються тисячі тонн відходів з яких можна отримати мільярди кіловат електроенергії або мільярди кубічних метрів біогазу.

Сільськогосподарський комплекс може забезпечити енергетичну незалежність країни від централізованого використання природних ресурсів. В Україні існує ряд проблем, які створюють перешкоди впровадженню сучасних методів утилізації та переробки відходів, а саме: застосування дорогих систем для переробки та утилізації відходів тваринництва та рослинництва; відсутність державної підтримки; низька наукова обґрунтованість систематизації сільськогосподарських відходів; повільне впровадження методів енергозбереження [60].

Досвід розвинених країн світу свідчить про необхідність використання відходів сільського господарства. На підприємствах по м'ясо переробці, відходами є кров, тельбухи, кістки, роги та копита, які збирають та використовують для виробництва кормів, косметики, лікарських препаратів та побутових миючих засобів. Гній використовують для удобрення полів або переробляють його у теплову та електричну енергію [61–63]. Сільськогосподарські відходи тваринництва та рослинництва хоч і є цінними матеріалами для отримання побутових, лікарських та інших біологічно активних засобів, але не завжди знаходять застосування, через що, виникає необхідність створення умов для раціонального управління відходами. Класифікація відходів впливає на визначення подальших дій з отриманими відходами (утилізація, переробка у біогазових установках, реалізація та інше) [64]. Класифікація відходів сільського господарства наведена у таблиці 1.1.

Класифікація відходів сільськогосподарських підприємств

За джерелом походження	Відходи головних виробництв
	Відходи допоміжних виробництв
	Відходи підсобних виробництв
За ступенем безпеки	Безпечні
	Небезпечні
За способом утилізації	Власними силами
	За допомогою переробних підприємств
За методом переробки	Біологічний
	Термічний
	Хімічний
	Механічний

Енергетичний результат підприємства залежить від обраних дій відносно відходів. До основних відходів рослинництва належать солома, рештки овочів, фруктів та стебла, листя рослин. До відходів тваринництва відноситься гній свиней, великої рогатої худоби, послід птиці, жир тварин, підстилка з соломи та трави, пір'я та інше [62]. Рослинні та тваринні відходи бувають, як в твердих, так і в рідких фракціях, які можуть використовуватися для виробництва кормів та різних вітамінних добавок, а також отримання паливного матеріалу та біогазу у результаті зброджування у біогазових установках.

Біогазові установки дозволяють переробляти відходи з отриманням метану. Вироблений біогаз можна використовувати для обігріву будівель та підігріву холодної води або ж для власних потреб підприємств. Недоліком біогазових установок є дороге обладнання та необхідність великої кількості площі поблизу сільськогосподарських підприємств, оскільки на віддалених площах виникає необхідність в підвезені великої кількості сільськогосподарських відходів для поновлення сировини у резервуарі. Виходячи з вище сказаного, біогазові установки ефективно будувати неподалік від великого переробного або сільськогосподарського підприємства.

На сьогоднішній день велику кількість вторинної сировини тваринництва

вивозять для удобрення полів та переорюють їх в землю, але існують прогресивні технології переробки, серед яких компонування, отримання добрив, біопалива, вітамінних концентратів тощо. Первинна переробка вторинної сировини тваринництва – це важливий напрямок розвитку новітніх технологій енергозбереження.

Сьогодні масового розповсюдження отримують біогазові установки, які дозволяють отримувати біогаз, екологічно чисті добрива при переробці відходів сільського господарства.

Процес первинної переробки відходів складається з чотирьох етапів: на першому етапі, відходи поміщують у підготовчу камеру в якій сировина підігрівается до початкової температури; на другому етапі, сировина подається у біогазовий реактор де підігрівается до температури анаеробного бродіння в залежності від вибраного температурного режиму зброджування (психрофільний, мезофільний або термофільний) і зброджується за умови відсутності потрапляння великої кількості кисню у реактор, при цьому, відбувається виділення метану, який відбирається з реактора. В наслідок зброджування при високих температурах хвороботворні бактерії гинуть, а сировина набуває поживних цінностей, хімічні сполуки розпадаються та переходять у форми, які засвоюються рослинними організмами стимулюючи ріст та врожайність сільськогосподарських культур; на третьому етапі відбувається розділення сировини на рідку та тверду фази; Четвертим та заключним етапом є вироблення та висушування гранульованих добрив.

При анаеробному зброджуванні відходів послід тварин та птиці, жир, пух та інші відходи сільського господарства не зберігаються довгий час, що зменшує можливість ризику пов'язаного з аварійними ситуаціями, викидами відходів у ґрунт та потрапляння у воду з подальшим забрудненням екологічної системи планети та впливом на кліматичні зміни. Також, зменшується ризик внесення у ґрунт разом із свіжим відходами великої кількості хімічних сполук, які погано засвоюються сільськогосподарськими культурами.

Залежно від технології біогазової переробки органічних речовин, залишки

від бродіння є повноцінним добривом, за своїм складом схожим на мінеральне добриво. У хімічному плані воно є менш агресивне ніж свіжий послід тварин та птиці, а також мають менш різкий запах. Такі добрива містять легкодоступні та необхідні для існування рослин поживні речовини та мінерали, калій, азот, фосфор та інше.

Ще однією сировиною для біогазового виробництва є відходи деревини, опале листя, гілки тощо. Екологічно важливою у різних країнах світу є проблема раціональної утилізації листя, з дерев в міських парків, трави, гілок тощо. Природні процеси розкладання листя досить повільні і складають, в залежності від вологості середовища, більше двох років. Утилізація такої рослинної біомаси в сміттєнакопичувачах вимагає значних витрат, а спалювання призводить до забруднення атмосфери.

Питанню утилізації відходів деревини та опалого листя шляхом анаеробного зброджування у біогазових реакторах присвячено велика кількість робіт вчених, серед яких: Сотник І. М., Єлізаров О. І., Лисенко О. І., Запорожець О. І., Д'яконов В. І. та інші [65 – 70].

В залежності від виду субстрату, який використовується відбуваються сильні коливання поживних залишків бродіння, однак в середньому вміст азотних речовин у залишках сировини після бродіння 70%, калію та фосфору – 100% у порівнянні зі свіжим гноєм.

Отриманий підчас анаеробного зброджування органічних відходів сільського господарства біогаз, може використовуватися для виробництва електричної та теплової енергії. Вугілля, нафта, природний газ, паливо можуть бути замінені біогазом. Таким чином, первинна переробка органічних відходів сільського господарства – це ефективні технології спрямовані на економічне застосування цінних компонентів у різних галузях побутового та виробничого життя усіх країн світу.

1.2. Огляд конструктивних та технологічних параметрів біогазових установок

Вирішення проблем переробки відходів сільськогосподарського походження, відкрили новий перспективний напрямок у конструюванні техніки та обладнання для агропромислового комплексу.

Про стрімкий розвиток та процес впровадження у виробництво інноваційних енерго- та ресурсозберігаючих технологій свідчить аналіз літературних джерел [31, 50 – 56, 71 – 75].

Багато країн Європи та Азії, такі як Австрія, Італія, Китай, Польща, Німеччина та інші країни за останні 20 років зробили надзвичайно великий крок у використанні відновлювальних джерел енергії. Перш за все, це зумовлено певним науково-технічним розвитком у галузі альтернативної енергетики перерахованих країн.

Ще у XVII столітті Ян Баптист Ван Гельмонт вперше виявив, що у процесі розкладання органічного субстрату, виділяються легкозаймисті гази.

У 1776 році, Алессандро Вольта провів дослідження та зробив висновок про існування залежності між кількістю органічного субстрату який розклався та кількістю виділеного з нього газу.

У 1808 році сер Хемфрі Деві виявив у об'ємі утвореному біогазі міститься метан [76].

Перша біогазова установка була побудована у 1859 році в Індії, у місті Бомбеї [77].

Сьогодні, найбільш розвиненим ринком біогазу є європейські країни, це пояснюється націленістю країн Європейського Союзу на розвиток та перехід до альтернативних джерел енергії з планомірним підтримуванням ініціативи спрямованої на впровадження біогазових комплексів. Зараз, у Європі близько 75 % біогазу виробляється з відходів сільського господарства, 17 % – з органічних відходів домогосподарств та приватних підприємств, 8 % – з муніципальних каналізаційних систем, стічних вод [78].

В Німеччині 65% тепла та електроенергії виробляються процесами на основі органічних субстратів забезпечуються спалюванням залишкової деревини, з подальшим використанням промислової залишкової деревини та дозрілого лісу. Близько 14% енергії надходить від використання рідких або газоподібних біологічних енергоносіїв [78].

1.2.1. Будова резервуарів біогазових установок

Анаеробне зброджування органічних субстратів здійснюється в біогазових установках. У вітчизняній та закордонній літературі біогазові установки поділяють за кількома ознаками:

За типом технологічної схеми завантаження – вивантаження субстрату [71]:

- періодичної дії;
- безперервної дії.

За продуктивністю біогазові установки поділяються на [71, 72, 78]:

- малі, об'ємом реактора до 50 м³;
- середні, об'ємом реактора від 50 до 200 м³;
- великі, об'ємом реактора понад 200 м³.

На основі об'єму реактора біогазові установки можна поділити на три типи [71, 72, 78]:

- побутові;
- дослідницькі;
- промислові.

За типом використовуваного субстрату [71, 72, 78]:

- сільськогосподарські;
- комунальні;
- з переробленням відходів переробної галузі аграрно-промислового комплексу;
- змішані.

За температурними режимами зброджування, біогазові установки поділяють

на [71, 78 – 80]:

- психрофільні (20-25 °С);
- мезофільні (30-35 °С);
- термотолерантні (40 °С) [78];
- термофільні (50-55 °С).

За розміщенням біореактора біогазові установки бувають [81]:

- надземні;
- підземні.

Резервуар – є основною частиною будь-якої біогазової установки, через це, до його конструкції висувають високі вимоги. До основних вимог, які висуваються до біогазових резервуарів належать:

- гідравлічні;
- технологічні;
- теплотехнічні;
- економічні;
- естетичні.

Корпус біогазового резервуару повинен поєднувати у собі міцність та абсолютну герметичність усіх стінок та з'єднувальних швів. Обов'язковим є теплоізоляція стінок та властивість цих стінок протистояти корозії. Особливу увагу потрібно приділяти завантаженню та вивантаженню резервуара, а також доступ до зовнішніх стінок та внутрішнього простору для проведення технічного обслуговування.

Всі біогазові установки мають однаковий принцип роботи: після збирання сировини її підготовлюють до подачі в біогазовий резервуар, тобто, в спеціальній ємності, доводять до необхідної вологості та початкової температури, після чого сировина подається в біогазовий резервуар, в якому створюються умови необхідні для протікання процесу анаеробного бродіння.

Вихід газу в промислових біогазових установках залежить від багатьох факторів, вплив яких обумовлюється конструкцією установки та виробничими умовами [71].

Класифікація біогазових резервуарів за конструктивними ознаками наведено на рис. 1.5.



Рис 1.5. Класифікація біогазових резервуарів за конструктивними ознаками

За гідравлічними та експлуатаційними характеристиками найоптимальнішими є яйцеподібні резервуари. За ними, раціонально використовувати конусні та циліндричні резервуари, оскільки, така форма резервуарів дозволяє зменшити гідравлічний опір при перемішуванні субстрату, через відсутність кутів, уникнути зон де відбувається скупчення шламів та застійної маси сировини, локалізувати місця для завантаження свіжої сировини, вивантаження відпрацьованого матеріалу, а також збирання утвореного у ході анаеробного зброджування біогазу.

Вище перераховане, дозволяє зменшити витрати енергії необхідної для

перемішування субстрату та підтримки встановленого температурного режиму анаеробного зброджування субстрату у біогазовому реакторі, за рахунок уникнення зон накопичення шламу та застійної сировини пришвидшується процес розкладання органічної сировини, і як наслідок, підвищується кількість утвореного біогазу.

За конструктивними особливостями біогазові установки поділяють на:

- одно реакторні;
- багато реакторні.

Використання багато реакторних установок дозволяє досягти безперервного циклу анаеробного зброджування органічних субстратів, через що, вони мають велику продуктивність, але при цьому, потребують значних енергетичних витрат на процеси інтенсифікації біогазового виробництва. Такі установки вигідно використовувати для задоволення потреб великого господарства, але при цьому основним фактором є безперервна подача великої кількості свіжої сировини, а також, великі потужності для використання або ж зберігання відпрацьованої сировини.

Будівництво біогазового комплексу в першу чергу починається з визначення необхідного об'єму біогазового реактора, типу та кількості доступної органічної сировини, методів підігріву та перемішування субстрату. Вибір типу біогазового реактора для кожного конкретного випадку залежить від багатьох чинників і виконується на підставі техніко-економічного обґрунтування. Виходячи з цього, існують різноманітні форми біогазових реакторів, основні з них наведені на рис. 1.6.

З точки зору міцності, створення умов для перемішування та вивантаження-завантаження сировини, утворення та руйнування кірки на поверхні субстрату, оптимальну форму мають реактори яйцеподібної форми (рис. 1.6 а). Проте, застосування такої форми біогазових реакторів у приватних та виробничих об'єктах обмежене, у зв'язку з високою вартістю та складностями пов'язаними з їх виготовленням.

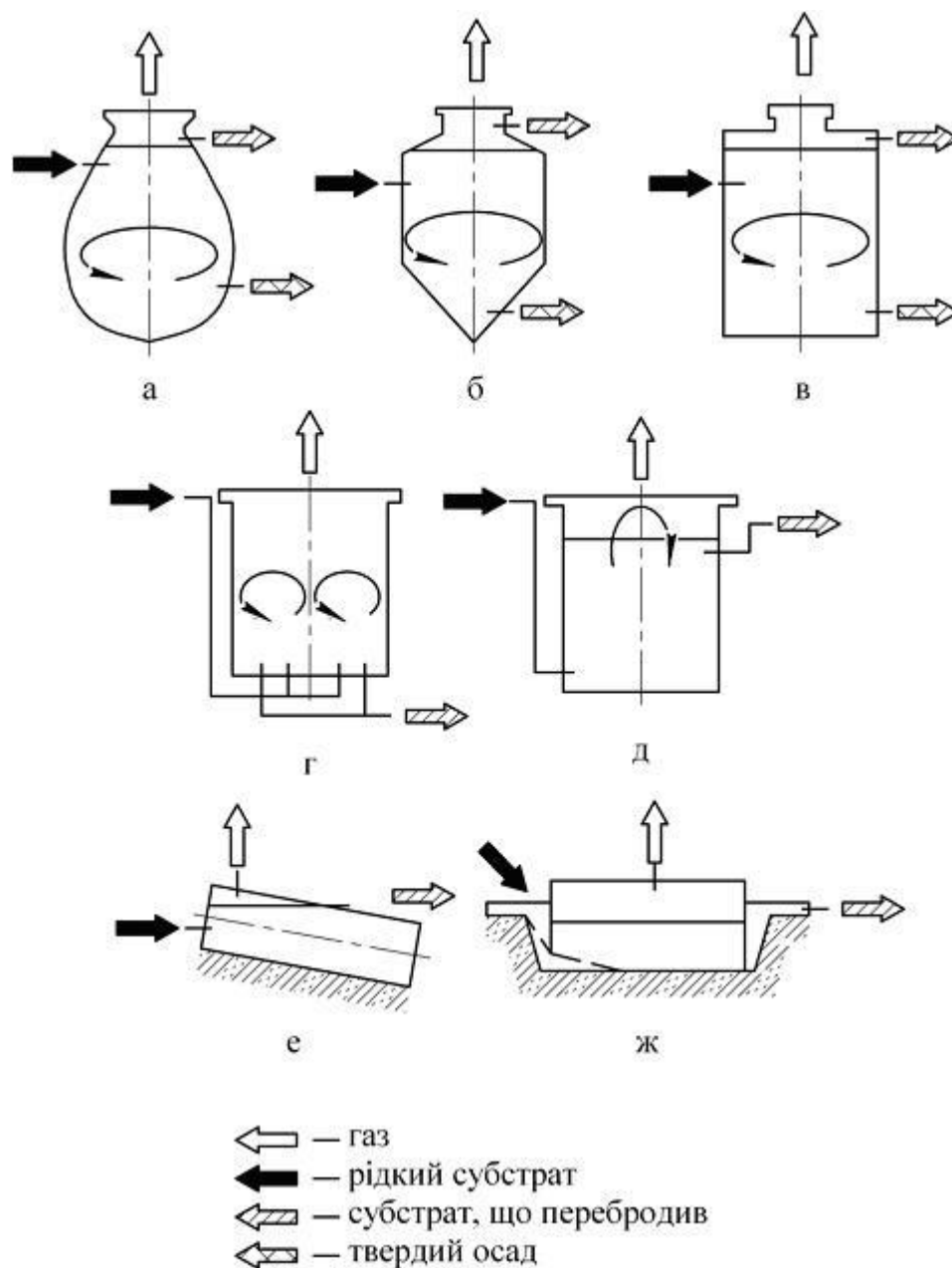


Рис. 1.6. Найбільш поширені типи резервуарів біогазових реакторів:

а) у вигляді яйця; б) циліндричний з конусними верхньою та нижньою частинами; в) циліндричний; г) циліндричний з перегородкою; д) у вигляді паралелепіпеда (з перегородкою); е) циліндричний (розміщений з нахилом); ж) траншея в ґрунті (із кришкою).

До переваг циліндричного реактора з конусною верхньою та нижньою частинами (рис. 1.6 б) відносяться:

- наявність невеликого простору для накопичення утвореного об'єму біогазу;

- утворення кірки відбувається в обмеженому об'ємі;
- відвід відпрацьованого шламу.

Недоліки:

- у порівнянні з біогазовими реакторами яйцеподібної форми, погіршенні умови перемішування субстрату за рахунок гідравлічних опорів.

Найпростіші за своїм виконанням є циліндричні резервуари. Їх виробляють із металевих цистерн та ємностей різних габаритних розмірів та об'ємів, які використовують у промисловості.

Циліндричний резервуар (рис. 1.6 в) у порівнянні з вище зазначеними формами реакторів створює гірші умови для перемішування субстрату. Через велику поверхню контакту субстрату з атмосферою, вимагає більших витрат на руйнування кірки та збільшення електричної енергії для перемішування субстрату. До переваг можна віднести простоту виготовлення циліндричних резервуарів від малих до великих об'ємів.

Під час розділення циліндричного резервуара з перегородкою (рис. 1.6 г, д) можна отримати дві камери, це необхідно під час проведення двофазного процесу метанового зброджування органічного субстрату. При такому компонуванні зменшується поверхня біогазового реактора, яку необхідно тепло ізолювати, а також відбувається покращення теплопередачі між обома камерами через перегородку, яка у свою чергу виконується з теплопровідного матеріалу. Недоліком даної системи є необхідність контролювати окремо дві частини реактора, а оскільки в кожній з частин працюють свої бактерії тому, параметри мікроклімату, а саме: температура, рівень кислотності, вологість субстрату, час перемішування та тривалість метанового зброджування будуть різними, через, що використання таких резервуарів вимагає великих енергетичних витрат, а також складніших систем контролю за протіканням технологічного процесу утворення біогазу.

У індивідуальних установках приватного користування також можна зустріти біореактори кубічної форми (рис. 1.7).

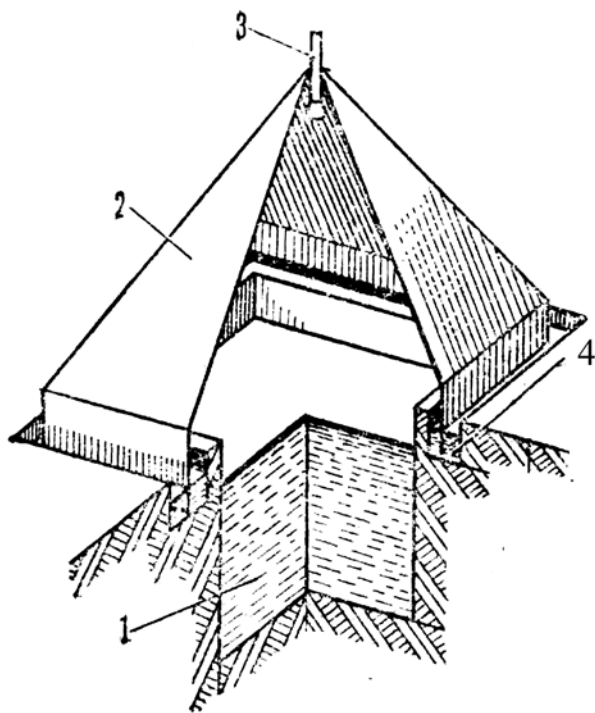


Рис. 1.7. Кубічна форма біореактора малої продуктивності: 1 – субстрат, 2 – купол (збірник біогазу), 3 – відвід біогазу, 4 – водяний заслін або бетонний фундамент (для уникнення втрати біогазу через місця кріплення купола).

Такий реактор додатково може бути розділений на дві камери: головну та камеру залишкового зброджування для осадження шламу.

Слід зазначити, що установки цього типу не дозволяють отримати високий рівень розкладання субстрату. Внаслідок чого, утворений біогаз має низьку якість та малий вміст метану. Це пов'язано з тим, що в даних реакторах не забезпечується рівномірне перемішування маси та підтримки температури в певних діапазонах, що в свою чергу впливає на швидкість та кількість виробленого газу. Руйнування кірки та видалення шламу пов'язано з великими економічними втратами.

У наступному типі резервуарів субстрат у процесі перемішування, переміщується у повздовжньому напрямі, це горизонтальний циліндричний резервуар, з нахилом в один бік (рис. 1.6 е). Похиле розташування повздовжньої осі резервуара полегшує переміщення шламу до вивантажувального отвору. Такий резервуар з одного боку не потребує великих потужностей для перемішування субстрату, оскільки шлам з легкістю по нахилу зсувається до вивантажувального отвору, але, це також виступає недоліком, оскільки переміщення субстрату до нижньої точки отвору призводить до розшарування субстрату, в точці завантаження відбувається розміщення легких речовин, тоді як всі поживні речовини одразу осідають поблизу вивантажувального отвору перемішуючись з відпрацьованим шламом. Наслідком цього є зниження кількості виробленого газу, а для рівномірного розподілення субстрату по всьому об'єму

резервуара необхідно встановити мішалки більшої потужності, що за собою тягне збільшення енергетичних витрат.

Біореактор у вигляді траншеї у ґрунті з кришкою (рис. 1.8) дозволяє обробляти великі об'єми субстрату [71].

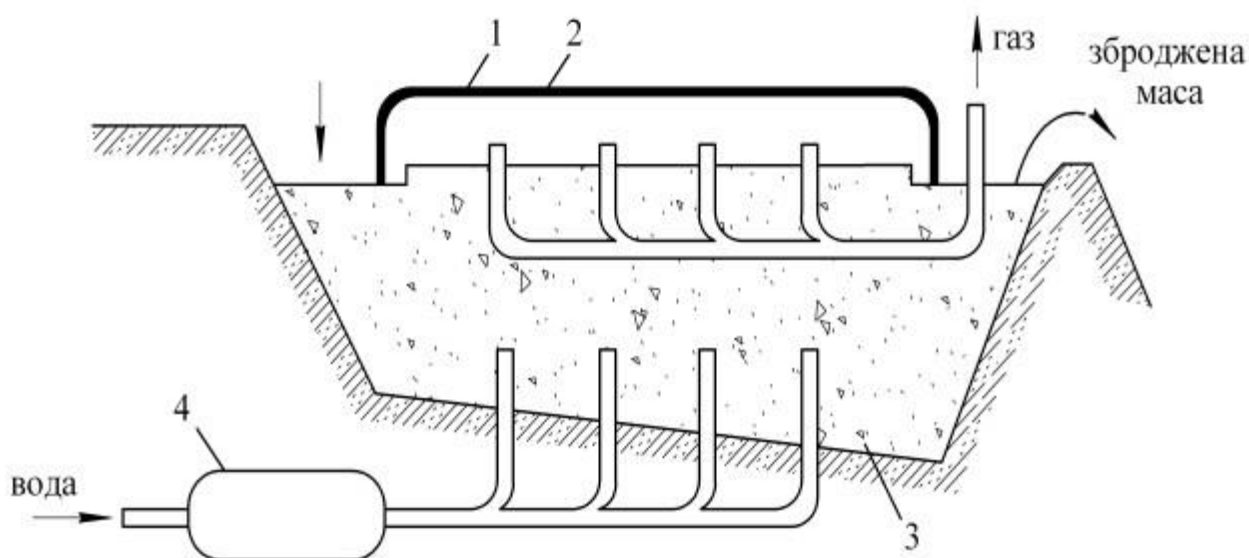


Рис. 1.8. Траншейна біогазова установка [71]: 1 – збірник біогазу (кришка); 2 – плити із пінопласту; 3 – бродильна камера; 4 – нагрівач (бойлер)

В якості будівельного матеріалу для таких реакторів використовують, як правило бетон, зверху такий реактор накривають ковпаком-збірником газу, виконаним з металу у вигляді плаваючої кришки. Переваги такого реактору: простота будівництва, простий контроль за кількістю виробленого газу (піднімання кришки залежить від кількості кришки і визначається безпосередньо від ваги самої кришки). Недоліком таких реакторів є чутливість металевої кришки до корозії, а також ускладнений процес перемішування та підтримки параметрів температури, вологості та кислотності у резервуарі. Такі реактори ефективно використовувати в місцях з теплим кліматом, широкого розповсюдження набули переважно в Індії.

Ще одною розповсюдженою формою реакторів є двокамерна біогазова установка проточного типу (рис. 1.9).

Будівництво резервуара з перегородкою буде дешевшим ніж спорудження

кількох резервуарів та з'єднання їх у одну систему, для надання конструктивних переваг, в перегородку таких резервуарів запускають теплоносії (гарячу воду) [71].

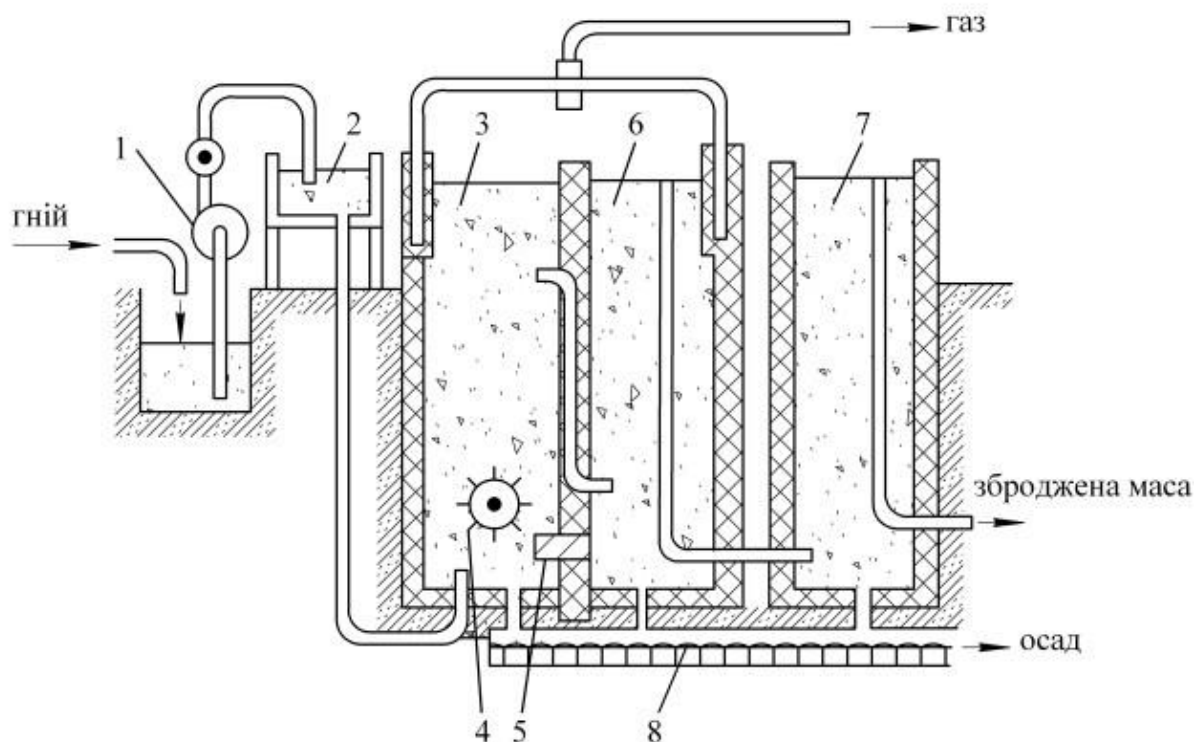


Рис. 1.9. Двокамерна біогазова установка проточного типу [71]: 1 – насос; 2 – приймальна камера; 3 – бродильна камера; 4 – пристрій для перемішування; 5 – підігрівач субстрату; 6 – камера кінцевого зброджування; 7 – збірник збродженої маси; 8 – шнек

Останнім часом широкого використання в країнах Південно-Східної Азії набули еластичні біогазові реактори (рис. 1.10) [71].

Еластичні біогазові реактори виготовляють із міцної гумової тканини або синтетичної плівки. Робота таких біогазових реакторів можлива якщо їх занурити у ґрунт або розміщувати в середині якоїсь будівлі або міцного огороження [71].

Для завантаження свіжої та вивантаження відпрацьованої сировини використовують труби, які приєднуються безпосередньо до пластикового або гумового мішку. Тиск газу досягається шляхом еластичного розтягування купола реактора і за рахунок додаткового вантажу який кладуть зверху на купол.

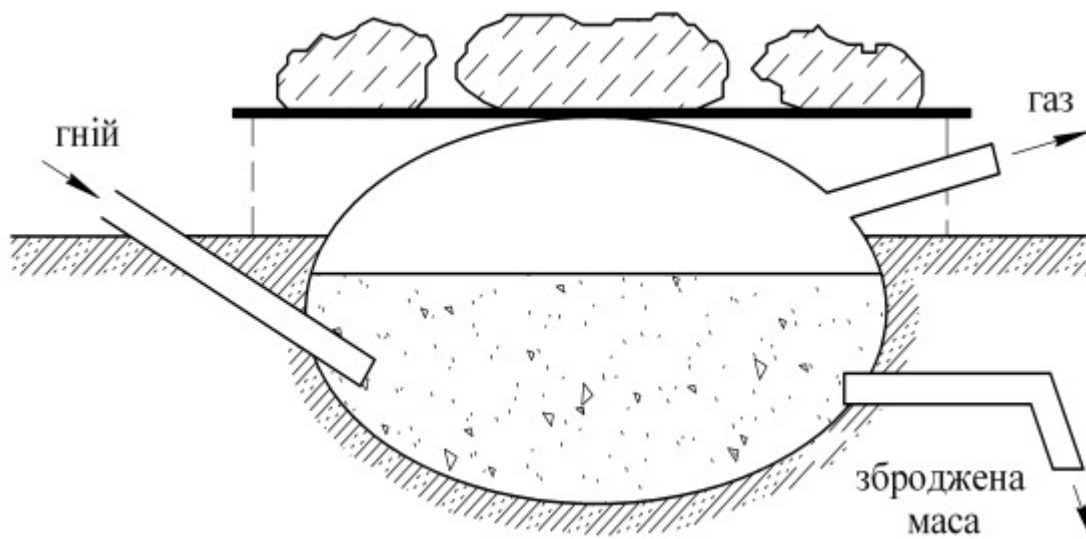


Рис. 1.10. Еластичний біогазовий реактор [71]

Переваги еластичного біореактора [71]:

- низька вартість будівництва;
- простота конструкції;
- легкість переміщення;
- простота очищення, завантаження та вивантаження сировини;
- висока температура зброджування для психрофільного режиму.

Недоліки:

- висока чутливість до зовнішніх факторів;
- можливість роботи тільки у країнах з жарким кліматом;
- можливість пошкодження еластичного ковпака;
- короткий термін експлуатації (2-5 роки) [71].

В Україні та країнах з холодним кліматом застосовують біореактори з утепленням стінок, найбільш розповсюджена конструкція з циліндричним резервуаром та конусами доверху та донизу [71]. Конструкція реактора (рис. 1.11) з прошарком утеплювача дозволяє підвищити термічний опір стінки резервуара.

Перевагою використання резервуара з утепленими стінками є значне покращення процесу бродіння шляхом використання теплоти виділеної в процесі бродіння та підігрівання субстрату в зимових умовах, в результаті чого, досягається покращення процесу анаеробного бродіння, що призводить до

збільшення виходу біогазу і зниження енерговитрат.

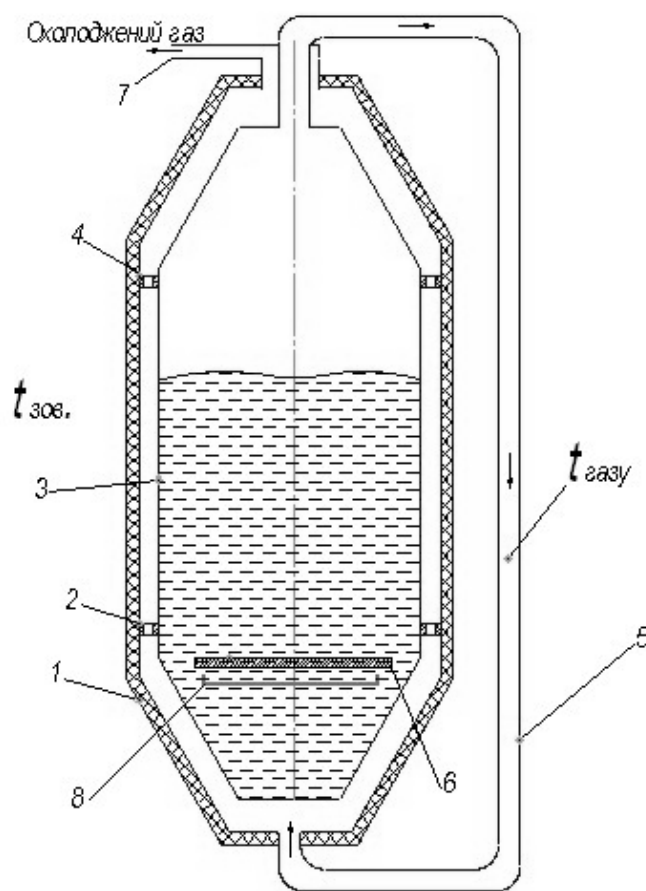


Рис. 1.11. Біогазовий реактор з утепленим корпусом

Реактор (рис. 1.11) містить утеплений корпус 1. За допомогою верхньої 4 та нижньої 2 опорних газорозподільних решіток, до корпусу кріпиться робочий резервуар 3. В верхній частині якого закріплено газопровід 5. Він в свою чергу сполучає низ утепленого корпусу та верх робочого резервуара. У нижній частині робочого резервуара розміщено нагрівальний елемент 6 та мішалку 8. У верхній частині корпусу розміщено патрубок відведення біогазу 7.

Процес вироблення біогазу протікає наступним чином. У

холодний період року в реакторі відбувається завантаження холодної порції субстрату, який має досить низьку температуру і призводить до термічного розширювання середовища. Нижня зона при цьому стає холодною, а верхня перегрівається. Газ при виході з робочого реактора має температуру процесу $t_{\text{газу}}$, яка згідно з вимогами повинна бути в межах вибраного режиму протікання анаеробного процесу. Ця надлишкова температура перевищує температуру навколишнього середовища $t_{\text{зов.}}$.

При цьому, температура середовища в робочому резервуарі не рівномірна та її необхідно підтримувати на заданому технологічному рівні. Оскільки перепад температури на один градус призводить до зменшення виробленого газу. Для досягнення температурних меж, слугує нагрівальний елемент 6, а для якісного перемішування суміші – мішалка 8. Температура суміші коливається в об'ємі не

рівномірно: від перегріву навколо нагрівального елемента $t_{\text{нагрів}}$ в верхній зоні, до переохолодження в нижній зоні.

Біогаз за допомогою газопроводу 5 направляється в нижню зону, де розподіляється в між корпусному просторі за допомогою опорних газорозподільних решіток 2 та 4 і рівномірно обтікає внутрішню частину робочого резервуара. При цьому газ віддає своє тепло нижній холодній частині середовища шляхом теплопровідності через металеву стінку. При перегріві отриманий біогаз забирає надлишкове тепло з верхньої зони.

За рахунок цього, досягається температурна стабілізація всього процесу, що в свою чергу покращує процес анаеробного бродіння і збільшує вихід газу. Також, газ виконує роль додаткового тепло ізолятора. Біогаз виводиться з між корпусного простору за допомогою патрубку відведення газу, а між корпусний простір виступає, як газгольдер для тимчасового зберігання газу. При накопиченні біогазу в корпусному просторі за необхідності відбувається його відбір на потреби господарства. Для запобігання критичних режимів у верхній частині реактора встановлюють манометр із запобіжним клапаном та термометр.

1.2.2. Огляд конструкцій перемішуючих пристроїв у біогазових реакторах

У процесі протікання реакції сировина в реакторі має властивість розділятися на фракції. На дні реактора скупчується нерозчинний осад, а більш легкі фракції піднімаються на поверхню утворюючи плаваючу кірку, все це уповільнює швидкість реакції, а разом з тим і виділення газу. Для того щоб реакція протікала більш рівномірно та інтенсивно використовують перемішування.

Процес перемішування субстрату у біогазових установках застосовується для збільшення виходу біогазу в результаті анаеробного бродіння. Відсутність змішування має кілька недоліків, таких як нерівномірний розподіл матеріалу, погана текучість та зменшення тепло- і масообміну в процесі анаеробного зброджування [82 – 84].

Перемішування створює інтенсифікацію процесів всередині біореактора та запобігає утворенню осаду та кірки на поверхні субстрату, також за рахунок перемішування можна досягти рівномірного розподілу поживних речовин по всьому робочому об'єму метантенка, а також при поєднанні роботи перемішуючого та нагрівального пристроїв можна отримати рівномірний розподіл температури по субстрату. Всі перераховані переваги перемішування, призводять до збільшення утворення біогазу із органічних відходів, а отже, відбувається зростання ефективності біогазової установки.

Субстрат у резервуарі перемішують по кілька разів на день для досягнення наступних ефектів [85]:

- перемішування свіжого субстрату з ціллю рівномірного розподілення активних бактерій по субстрату;
- розподілення тепла з ціллю утримання рівномірного розподілу тепла, а також уникнення небажаних перепадів температури по об'єму субстрату;
- руйнування кірки та уникнення появи осаду;
- вирівнювання концентрації метаболітів, які утворюються у процесі бродіння та являються проміжним субстратом для мікроорганізмів та інгібіторів їх життєдіяльності.

Інакше кажучи, процес перемішування призначений для підтримання однорідної речовини у резервуарі біогазової установки.

Часте вмикання системи перемішування може нашкодити ферментаційним процесам, що протікають у біогазовому реакторі. До того ж, це призводить до вивантаження не повністю переробленого субстрату. Ідеальним з точки зору ефективності є обережне але інтенсивне механічне перемішування біомаси кожні 4-6 годин, по 15-20 хвилин за один цикл перемішування оскільки таке перемішування забезпечує збереження цілісності колоній бактерій.

Також, без встановлення перемішуючих пристроїв у резервуарі відбувається певне перемішування за рахунок термічної конвенції, тобто переміщення бульбашок газу з нижніх шарів субстрату до верху. Такого перемішування вистачає лише для текучих субстратів, таких як стічні води, при цьому швидкість

та кількість утвореного біогазу незначна, через що, у біогазових установках використовують наступні типи перемішуючих пристроїв [78, 86 – 92]:

- механічні;
- аеродинамічні;
- гідравлічні.

Дослідженням впливу перемішуючих пристроїв на процес анаеробного зброджування органічних субстратів різноманітних типів займалися вчені з різних країн світу, а саме: Elnakave G., Tufeski N., Kimchie S., Bello-Mendoza R., Borole A., Karim K., Singh S. P., Brade C. E., Трахунова І. О., та інші [86 – 104].

У таблиці 1.2. наведено експериментальні дані впливу способу перемішування на якість та кількість утворення біогазу [99].

Таблиця 1.2.

Утворення біогазу при різних способах перемішування

Спосіб перемішування	Утворення біогазу (л/л/добу)	Утворення метану з сухої речовини (л/г)
Відсутнє перемішування	0,92	0,19
Пневматичне	1,07	0,21
Механічне	1,14	0,23

У [100, 101] наведено результати досліджень, які вказують на ефективність обережного перемішування субстрату у біогазовому реакторі. Таким чином, обережне перемішування з використанням тихохідних механічних перемішуючих пристроїв забезпечує збереження цілісності колоній бактерій.

Trad Z.; Fontaine J. та інші [102] провели порівняльний аналіз трьох методів змішування та виявили, що рівень енергії витрачений на змішування для механічних змішувачів був найнижчим. Крім того, механічне перемішування сприяло створенню однорідності речовини при меншому часі перемішування та пришвидшеному масообміні, особливо у неньютонівських рідинах з високим рівнем органічної речовини. Тому, найбільш перспективним обладнанням для інтенсифікації протікання процесу анаеробного бродіння субстрату є біореактори із механічним перемішуванням. Про що свідчить інтенсивний розвиток

механічної технології перемішування субстратів у Європі [103 – 105].

Механічне перемішування здійснюється лопатевими, пропелерними, турбінними, якірними та спеціальними мішалками. Технічна характеристика механічних мішалок наведена у (Додатку Б). Класифікація механічних перемішувальних пристроїв, що використовуються у біогазових реакторах наведено на рис. 1.12.



Рис. 1.12. Класифікація механічних перемішувальних пристроїв для біогазових реакторів

Також механічні мішалки поділяються на два типи:

- тихохідні (лопатеві, якірні, рамні, шнекові, скребкові, швидкість яких не перевищує 80 об/хв);
- швидкохідні (турбінні, пропелерні).

Турбінні мішалки оснащено лопатями з чітко окресленим ротором. Діаметр мішалок вибирають в діапазоні $d_m = (0,25 \dots 0,5) \cdot D$, в залежності від розмірів резервуару, при цьому великі значення беруть для субстратів з великою густиною. Залежно від способу кріплення лопатей та їх конфігурацій в анаеробній біоконверсії зустрічаються різні типи турбінних мішалок. Найбільш простою та одночасно високоефективною є мішалка з прямими радіально розміщеними лопатями (рис. 1.13). Плоскі лопаті можуть бути нахилені під певним кутом

відносно площини обертання мішалки, це робиться для кращого перемішування субстрату.

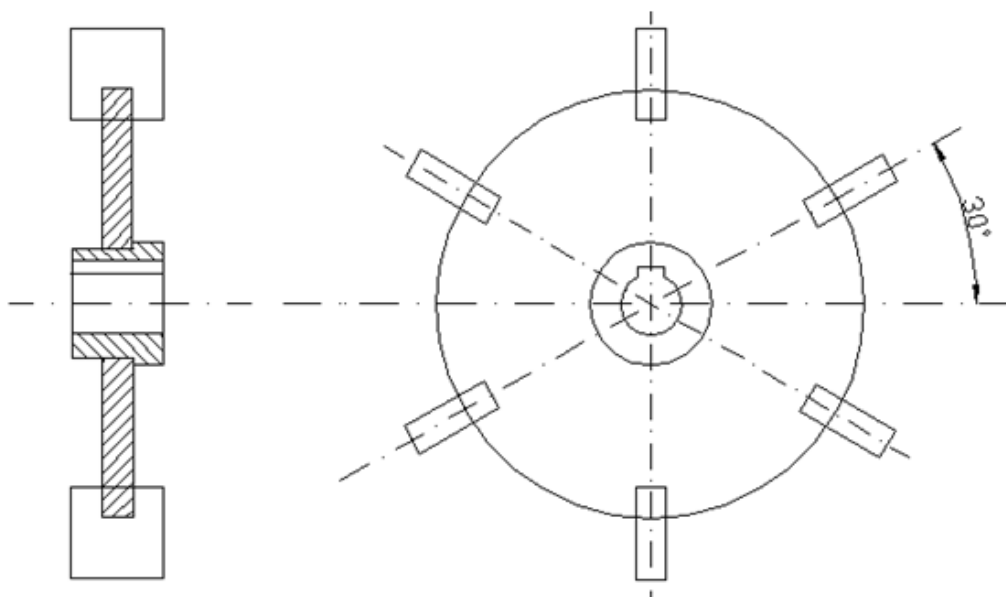


Рис. 1.13. Відкрита турбінна мішалка з прямими лопатями

Відкриті турбінні мішалки з прямими лопатями виготовляють у формі диску з закріпленими на ньому плоскими лопатками, які розміщені радіально на яких кріпляться радіальні лопатки $d_2 = 0,75 \cdot d_m$, довжина лопатки $l = 0,25 \cdot d_m$. Мішалки такого типу застосовують для забезпечення швидкого розчинення твердих субстратів та створення однорідної консистенції у реакторах. Швидкість обертання до 7 м/с.

Іншим типом турбінних мішалок, є закриті мішалки, які працюють за принципом відцентрового насосу. Вони складаються з втулки зі спицями або двох пластин між якими розміщено від 3 до 12 лопаток (рис. 1.14). При обертанні турбінної мішалки рідина засмоктується в простір між спицями та лопатками і з силою викидається назовні. Закриті турбінні мішалки застосовують для таких же цілей, що і відкриті. Діаметр турбіни $d_m = (0,25 \dots 0,33) \cdot D$, швидкість обертання, як і у відкритих турбінних мішалках до 7 м/с.

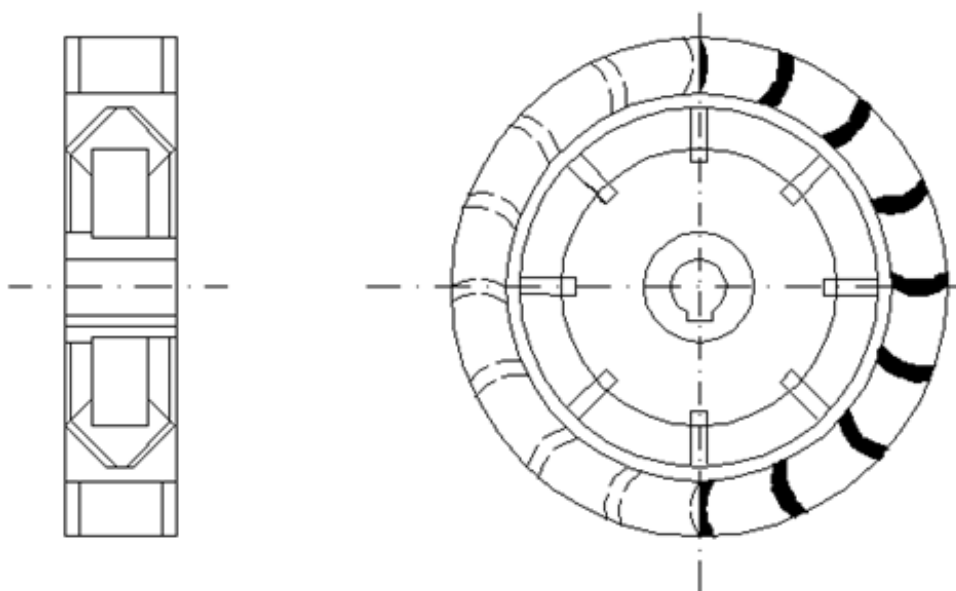


Рис. 1.14. Закрита турбінна мішалка

Інколи канали турбінної мішалки встановлюють так, щоб потоки йшли на зустріч один одному. Тобто, через верхній канал рідина виходить по напрямку зверху до низу, а із нижнього – в горизонтальному напрямку, як наслідок потоки стикаються один з одним створюючи інтенсивніший ефект перемішування (рис. 1.15).

Таким чином, у турбінних мішалок напрямок руху рідини може плавно змінюватися від вертикального до горизонтального, при цьому втрати кінетичної енергії потоку будуть невеликі. Потоки рідини, які виходять з турбінної мішалки мають високу швидкість, що змушує їх розподілятися по різних напрямках тим самим створюючи ефективне перемішування всього об'єму субстрату.

Вартість турбінних мішалок доволі велика. Їх застосовують в тих випадках коли густина субстрату велика, або ж у випадку коли технологічний процес не дозволяє використання іншого типу перемішуючого пристрою.

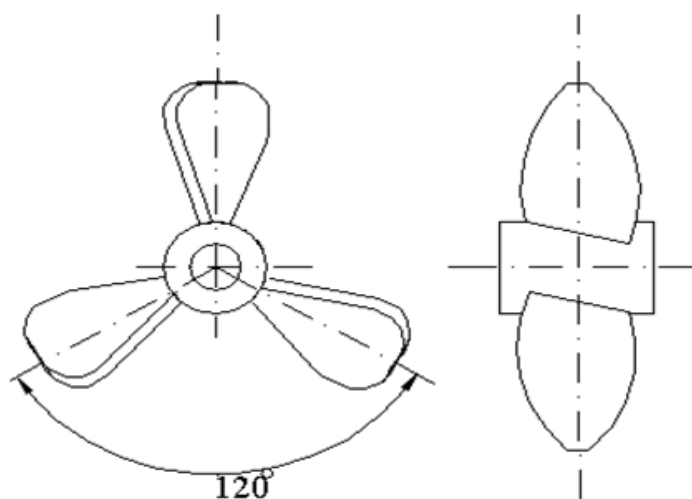
Турбінні перемішуючі пристрої використовують для перемішування органічного субстрату з великими твердими частинами [106], оскільки для завдання кінетичної енергії переміщення важкої частини у об'ємі речовини потрібно створити зусилля, котре буде рівне зусиллю необхідному для зрушення цієї частини.



Рис. 1.15. Процес
перемішування турбінною
мішалкою.

Ще один тип швидкохідних механічних перемішувачів є – пропелерні мішалки (рис. 1.16). Коли необхідно створити значну циркуляцію субстрату найбільш ефективними вважаються пропелерні мішалки. Вони створюють необхідну циркуляцію в біогазовій установці з мінімальними витратами механічної енергії. Пропелерні мішалки, за рахунок насосного ефекту створюють осьову циркуляцію органічних відходів у реакторі біогазової установки, тому вони легко піднімають тверді частини з його дна.

Лопатева пропелерна мішалка представляє собою елемент геометричного гвинта, а поверхня елемента є частиною гвинтової поверхні. Пропелер може бути безпосередньо насаджений на вал електричного двигуна (рис 1.16 б) або враховуючи умови перемішування та висоту субстрату, кількість пропелерів може бути різним, для цього, використовують редуктор, до робочого валу якого прикріплюють необхідну кількість пропелерних мішалок.



а)

б)



Рис. 1.16. Пропелерні мішалки [78]

Також для покращення циркуляції субстрату, інколи пропелерну мішалку встановлюють всередині дифузора (рис. 1.17).

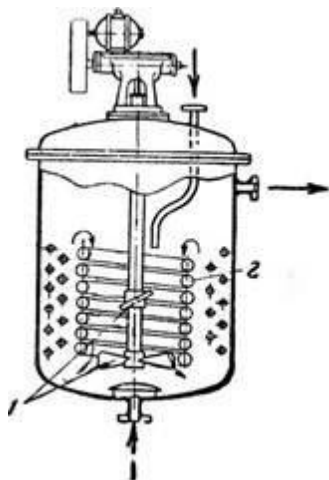


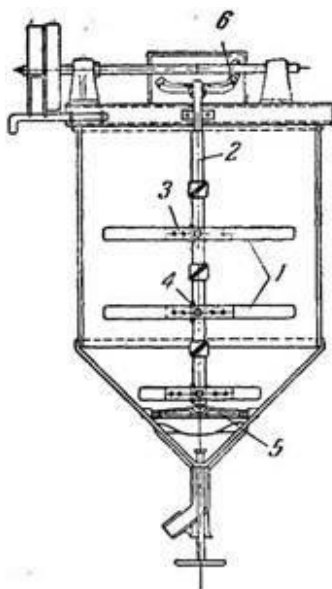
Рис. 1.17. Подвійна пропелерна мішалка з використанням дифузора

[78]: 1 – пропелер;

2 – дифузор

Дифузори застосовують в апаратах в яких встановлені труби, змійовики та апаратах, які мають велике відношення висоти до діаметра реактора. Для покращення перемішування встановлюють кілька пропелерних мішалок, а використання дифузора дозволяє підтримувати температуру на потрібному рівні. Перевагами пропелерних мішалок є висока інтенсивність перемішування, невисока вартість, а до недоліків відносять малу ефективність перемішування речовин з низькою густиною, обмежений об'єм інтенсивного перемішування, низька ефективність змішування рідин з твердими домішками.

Найбільш розповсюдженими є лопатеві мішалки (рис. 1.18). Вони першими почали використовуватися у біогазових установках та промисловості взагалі.



а)



б)

Рис. 1.18. Лопатева мішалка [78]: 1– лопаті ; 2 – вал; 3 – накладка; 4 – шпонка;
5 – підп'ятник; 6 – зубчаста передача

Лопатевими мішалками називають пристрої, які складаються з кількох лопатей прямокутного перерізу, закріплених на вертикальному (рис. 1.18 а) або горизонтальному (рис. 1.18 б) валу, що обертається.

На сьогоднішній день лопатеві мішалки використовуються у тих випадках, коли немає необхідності в інтенсивній радіально-осьовій циркуляції органічної суміші.

Переваги лопатевих мішалок:

- простота та низька вартість.

Недоліки лопатевих мішалок:

- мала інтенсивність перемішування;
- слабкий осьовий потік, через що неможливо забезпечити перемішування всього об'єму рідини в резервуарі.

Через слабкий осьовий потік, лопатева мішалка перемішує лише ті прошарки субстрату поблизу яких розташована мішалка. Через що, в об'ємі субстрату який перемішується створюється повільний розвиток турбулентності тому циркуляція субстрату повільна. Тому, лопатеві мішалки не вигідно застосовувати для перемішування речовин, які мають властивість розшаровуватися.

До лопатевих перемішуючих пристроїв також відносяться рамні та якірні мішалки (рис. 1.19).

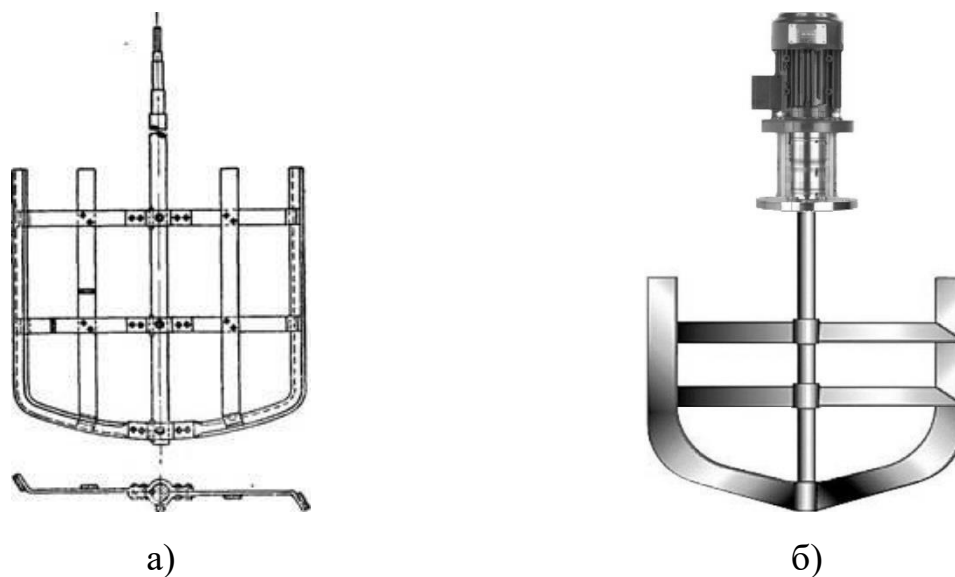


Рис. 1.19. Лопатеві мішалки [78] а) рамна мішалка; б) якірна мішалка

Для покращення перемішування використовують рамні мішалки з горизонтальними та вертикальними лопатями (рис. 1.19 а) у яких нижня лопать має форму вигнуту по радіусу резервуара. Такі лопаті використовують у випадках коли густина субстрату надто велика, для створення жорсткості перемішуючого пристрою та ефективності процесу перемішування.

Для інтенсифікації процесу перемішування використовують якірні мішалки (рис. 1.19 б). Оскільки плоскі лопаті мішалок, поверхні опору яких перпендикулярно направлені руху субстрату який переміщується, не можуть забезпечити ефективного перемішування у всіх прошарках субстрату, тому що, потоки які зустрічаються з плоскими лопатками відштовхуються від неї у різних напрямках, але отримують малу кількість кінетичної енергії, що не створює інтенсивності потоків. Як наслідок, перемішування має мало ефективний характер. Для уникнення цього, необхідно розміщувати лопатки під певним кутом. Таким чином під час переміщення отримуємо, як горизонтальний опір так і вертикальний. Від кута нахилу лопатки залежить в якому напрямку буде переміщуватися субстрат під час контакту з лопаткою. Кут нахилу вибирається безпосередньо від поставленої задачі, фізико-хімічних параметрів речовини котра переміщується та необхідних умов перемішування.

Таким чином, якщо необхідно піднімати субстрат з низу до гори, тоді лопатка нахилена на 90^0 , а якщо навпаки, зверху до низу – лопатка повинна бути нахилена на -90^0 . Кут нахилу лопаток змушує субстрат набирати енергію і переміщуватися по нахиленій площині лопатки, проти напрямку обертання мішалки.

За використання якірних або рамних мішалок можна уникнути місцевого перегріву органічного субстрату або виникнення осаду на дні біогазового реактора.

Наступний тип перемішуючого пристрою – шнекові мішалки (рис. 1.20). Шнекові механічні мішалки працюють за принципом підйому субстрату з нижніх шарів до верху. Вони застосовуються для перемішування сумішей великої в'язкості.

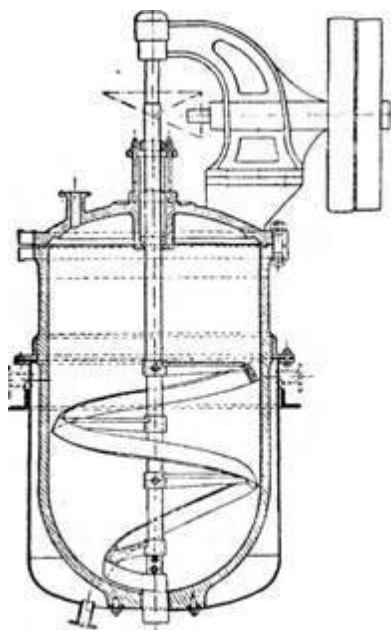


Рис. 1.20. Шнекова мішалка

Використання таких мішалок, як дискові та скребкові в процесах біоконверсії є неефективним, оскільки дискові мішалки працюють на високих швидкостях та використовують переважно в розчинах з малою кількістю твердих частин, тому в біогазових установках майже не застосовуються.

Під час проведення аналізу літератури виявлено велику кількість запропонованих біогазових реакторів з різноманітними конструкціями мішалок.

Найбільш використовувані системи перемішування субстрату у біогазових реакторах є: лопатеві змішувачі (рис. 1.21), шнековий змішувач (рис. 1.22) та вертикальна пропелерна мішалка (рис. 1.23).

Біогазовий реактор з лопатевим перемішуванням (рис. 1.21) [107] працює за наступним принципом. Через бункер завантаження 5 сировина завантажується в біореактор 1, крізь шибєрну засувку 6. В конструкції перемішуючого пристрою передбачений нагрів біомаси 3, за допомогою гарячої води, яка протікає через вал змішувального пристрою 2. На підігрівачі 3 біомаса

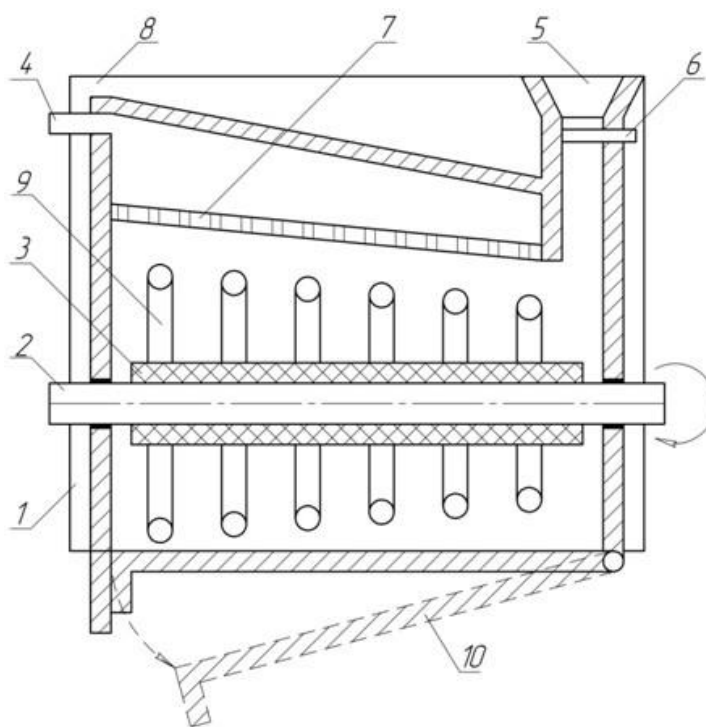


Рис. 1.21. Біогазовий реактор з лопатевим перемішуванням [107]

нагрівається та за допомогою лопатевих мішалок 9 розподіляється по об'єму біогазового реактора. У процесі анаеробного зброджування утворений біогаз, рухається через газорозподільну решітку 7 та виходить крізь штуцер відведення

біогазу до труби споживача 4. В конструкції розроблене специфічне дно 10, яке опускається вниз і відпрацьована сировина вивантажується з біогазового реактора. Біогазовий реактор зверху накритий плівковим куполом 8.

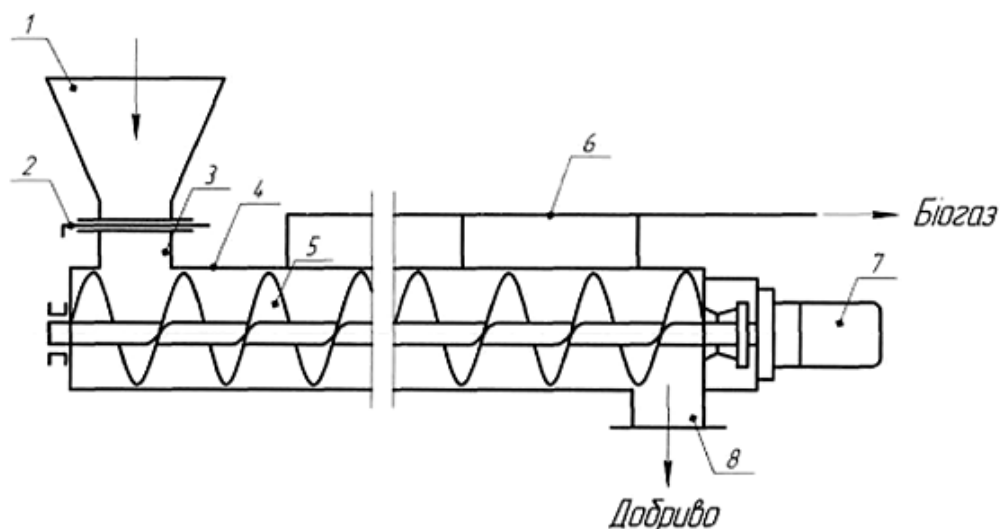


Рис. 1.22. Біогазовий реактор із шнековим перемішуванням [108]

Біогазовий реактор на основі шнекового конвеєра містить горизонтальний циліндричний корпус, всередині якого розміщено пустотілий вал з неперервною шнековою лопаткою.

Біогазовий реактор (рис 1.22) [108] виконаний у циліндричному корпусі 4, всередині якого розміщено гвинт 5, який приводиться в рух електроприводом 7. У корпусі розміщено вхідний 3 та вихідний патрубки 8. Через які відбувається завантаження свіжої сировини та вивантаження відпрацьованої. Перед вхідним патрубком встановлена заслінка 2 та завантажувальний бункер 1. Для відбору утвореного газу по довжині реактора встановлено ніпелі 6.

Пристрій працює наступним чином [108]. Через вхідний патрубок 3 сировина потрапляє у реактор 4. Далі сировина по реактору пересувається за допомогою шнекового транспортера 5, який приводиться в рух електричним двигуном 7. Біогаз який утворився в процесі метанового бродіння, виводиться через газопровід 6. Зброджений субстрат, пройшовши весь реактор виводиться через патрубок 8. Процес бродіння в даному реакторі є періодичної дії за рахунок відсутності перемішування сировини між початковою та кінцевою фазою. Автор

[108] запевняє, що використання такого типу перемішування та біореактора дає можливість проводити зброджування відходів з малою вологістю, зменшити витрати води та енергії на початковий нагрів субстрату.

При даному принципі перемішування, зброджування субстрату відбувається за один період, від процесу завантаження до процесу вивантаження субстрату. Оскільки швидкість розкладання сировини залежить від багатьох факторів (температури, вологості, рівня кислотності, фізико-хімічних характеристик та інше) [79, 109 – 112], а звідси і активності метанотворюючих бактерій, тому велика кількість невідпрацьованого субстрату разом з бактеріями, буде видалятися з біореактора, і як наслідок, призведе до зменшення виділеного біогазу. Відсутність ефективного перемішування та підігріву субстрату також призведе до зменшення виходу біогазу.

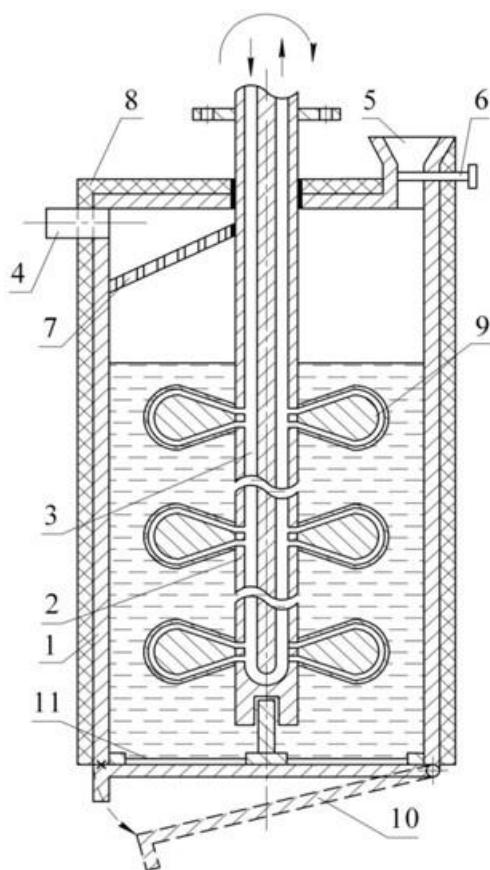


Рис. 1.23. Біореактор з вертикальною пропелерною мішалкою [113]

Наступним варіантом типу перемішування є біогазова установка з вертикальною пропелерною мішалкою (рис. 1.23) [113]. У роботах [71, 78] розглядається система нагрівання субстрату в біогазовому реакторі шляхом відкачування нагрітої води через теплообмінники. Біореактор містить резервуар 1, який зверху накритий куполом з плівки 8 [113]. Всередині резервуара 1 на валу 2 розміщена вертикальна пропелерна мішалка 9, яка призначена для перемішування біомаси. Всередині валу 2 встановлений підігрівач біомаси 3 (трубка для прокачування через неї гарячої води) [113]. Над вертикальною пропелерною мішалкою змонтована

захисна газорозподільна решітка 7, над якою влаштований штуцер відведення

біогазу до труби споживача 4 [113]. На дні 10, встановлено сітку з отворами 11 для проходження відпрацьованої маси. Дно має функцію опускання для вивантаження відпрацьованого субстрату [113].

Недоліком цієї конструкції перемішуючого пристрою є відсутність засобу для руйнування утвореної кірки на поверхні субстрату у біореакторі, а також неможливість регулювання температури теплоносія у окремих секторах біореактора. Нагріта вода нагрівається в котельних установках з частиною виробленого біогазу, за даними літератури [71] для нагріву води в котельні витрачається приблизно 30-40% від загального обсягу виробленого біогазу. Також суттєвим недоліком такої системи є поява «закупорок» у водопровідних трубах, яка пов'язана із жорсткістю води та наявності у ній солей [114].

Також в літературі досить часто зустрічається інформація використання гідравлічного перемішування у біогазових установках [87–90]. Система гідравлічного перемішування використовує потужний насос, який відповідає за наповнення ферментатора, а також за наповнення цистерн із резервуару зберігання [87–90]. Ця функція досягається шляхом зміни напрямку подачі субстрату за допомогою запірних кранів. Найчастіше гідравлічне перемішування використовують для реакторів великого об'єму. Структура гідравлічного перемішуючого пристрою наведена на рис. 1.24.

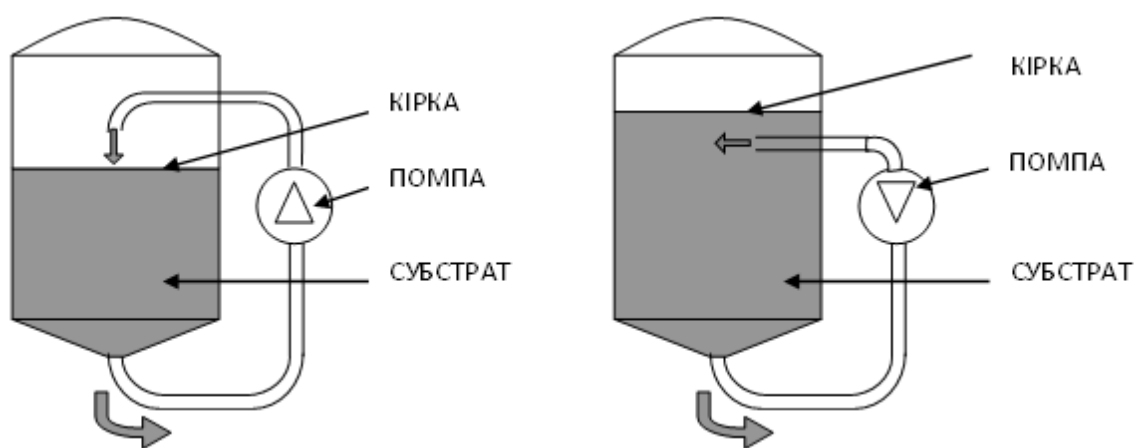


Рис. 1.24. Гідравлічне перемішування субстрату у біогазовому реакторі

Гідравлічне перемішування виконується наступним чином: за допомогою помпи, яка встановлена за межами резервуара (рис. 1.25) субстрат з нижньої

частини реактора перекачується в верхню, в результаті такого перекачування відбувається змішування різних шарів субстрату.

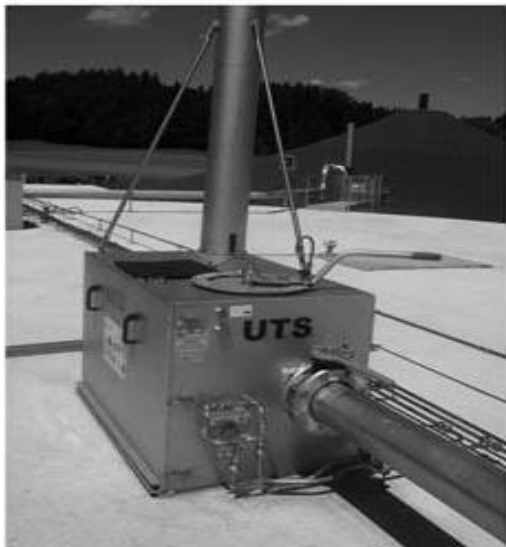


Рис. 1.25. Помпа для гідравлічного перемішування субстрату [78]

У багатьох закордонних біогазових установках зустрічається система із рухомим соплом. У цьому випадку, потік субстрату, який перекачується, за рахунок переміщення сопла, розповсюджується у всіх напрямках резервуару не залишаючи вільних зон. Недолік систем: оскільки pompa знаходиться на поверхні, у процесі перекачування субстрат виводиться за межі реактора де на нього впливає зовнішнє середовище, що призводить до збільшення тепловіддачі.

Іншим суттєвим недоліком який висвітлювали вчені у таких літературах [71, 78] є розбивання сімейства бактерій у процесі проходження субстрату через отвори помпи та патрубки, що призводить до зменшення виходу біогазу. Для малих біогазових установок використання такого методу перемішування є економічно невигідним, оскільки фекальні насоси мають високу вартість. Гарного перемішування можна досягти нагнітаючи вироблений біогаз назад у реактор (рис. 1.26). Однак, субстрат не повинен бути великої в'язкості та мати схильності до утворення кірки.

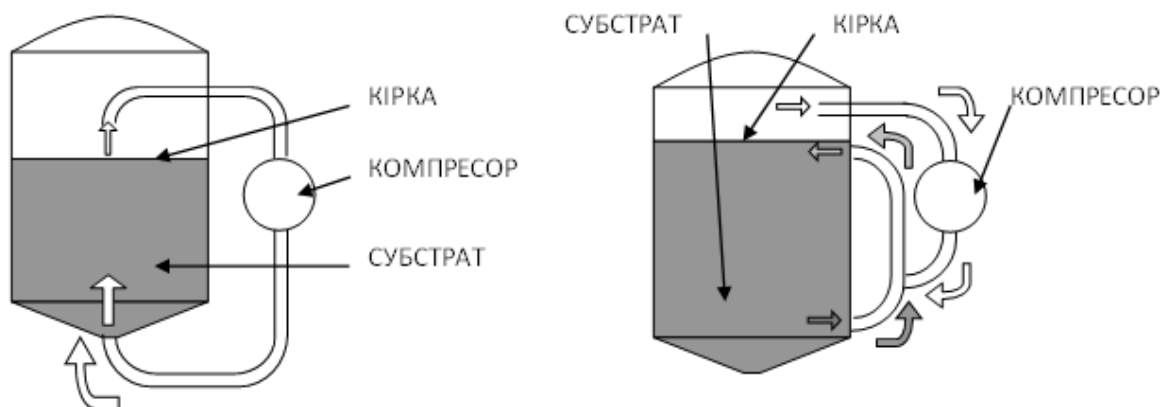


Рис. 1.26. Аеродинамічне перемішування субстрату в біореакторі [78]

Підчас підйому бульбашок газу оточуючий їх субстрат під дією тангенціального напруження приводиться в рух у напрямі поверхні субстрату.

На бульбашку газу діє гідростатичний стовп тиску, який створює рідина яка знаходиться над ним. По мірі підйому бульбашки тиск зменшується, відповідно розмір бульбашки поступово збільшується. При цьому, інтенсивність перемішування також збільшується, тому що під час розширення бульбашки поступово вивільняється енергія, яка викликає течії у рідині. Після виходу бульбашки газу на поверхню, субстрат винесений газом відтікає до стінок реактора і поступово починає опускатися до низу, де процес перемішування повторюється. Проте, бульбашки газу, які піднімаються у субстраті створюють тільки вертикальне перемішування. Такий темп мішалок не дає ефективного рівномірного перемішування, а з ним і розподілу поживних речовин для активних бактерій, що призводить до зменшення виходу біогазу [71, 78]. Це є одним з головних недоліків такого перемішування. Під час роботи з біогазовими установками необхідно враховувати пожежо- та вибухобезпечність обладнання яке встановлюється у біогазових реакторах. Оскільки пневматичне перемішування потребує наявності компресора, то необхідно підбирати якісний якісний пожежо- вибухобезпечний компресор, ціна якого доволі висока. Через що, використання пневматичного так як і гідравлічного перемішування доцільно більше для великих біогазових комплексів.

Доволі часто, з метою підвищення ефективності біогазової установки та зниження витрат на енергетичні ресурси, у науковій літературі [85] зустрічається інформація про використання альтернативних джерел енергетики, вітрових двигунів та сонячних батарей, котушок Тесла у поєднанні з високочастотним електромагнітним полем [115] для живлення перемішуючих та підігрівальних пристроїв. Однак, не зважаючи на стрімкий розвиток альтернативної енергетики, на сьогоднішній день, використання енергії вітру, води, сонця та інших альтернативних видів енергії для перемішування та електричного живлення підігрівальних пристроїв має суттєвий недолік, а саме, не можливість керування природними силами з можливістю безперебійного отримання електричної або

механічної енергії. Через що, на разі, не отримали широкого розповсюдження у біогазових технологіях.

Натомість, проводяться наукові дослідження різних електромеханічних конструкцій для перемішування [1, 97–104, 117], а також масове виробництво заглибних електричних перемішуючих пристроїв, потужність яких знаходиться в межах 0,6-110 кВт. На рис. 1.27. наведено зовнішній вигляд електромеханічних змішувачів субстратів. Потужність перемішуючих пристроїв компанії FAGGIOLATTI від 0,6 до 10 кВт, частота обертання від 460 до 1600 об/хв.

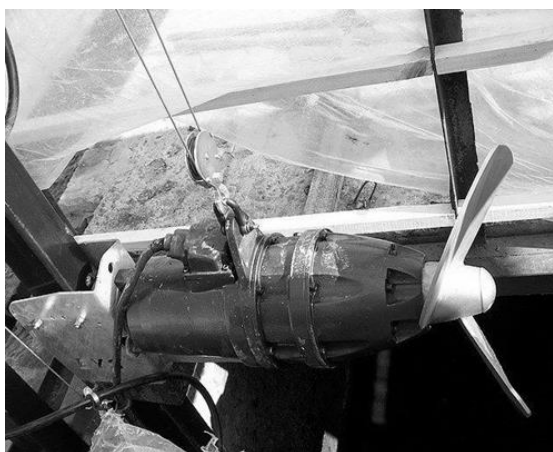


Рис. 1.27. Зовнішній вигляд електромеханічних змішувачів субстратів.

На рис. 1.28 наведено зовнішній вигляд електромеханічного змішувача субстратів виробництва компанії «Stallkamp».



Рис. 1.28. Зовнішній вигляд електромеханічного змішувача субстратів виробництва компанії «Stallkamp».

Наведені на (рис. 1.27 а, б) та (рис 1.28) електромеханічні заглибні перемішуючі пристрої за допомогою кріплення на хвостовій частині кріпляться до штатива, який жорстко закріплений у резервуарі. Таким чином, досягається можливість змонтувати електричний перемішуючий пристрій на будь-якій висоті у резервуарі. Кількість встановлених перемішуючих пристроїв залежить від об'єму реактора та фізико-хімічного складу субстрату.

Однак, у літературах [116, 117], вказано, що ефективне перемішування сировини, при використанні таких перемішуючих систем, можливе за умови частоти обертання пропелера 90-350 об/хв. У [78] стверджується, що високі оберти перемішуючого пристрою призводять до розбиття та гибелі колоній метаноутворюючих бактерій. У [7, 8] досліджено процес енергетичного споживання перемішуючим пристроєм в залежності від частоти обертання лопатей, та встановлено, що пришвидшення обертів збільшує споживану потужність. Це призводить до збільшення енергетичних витрат та зниження рентабельності біогазового виробництва.

Згідно, з аналізом літературних джерел та проведеними власними дослідженнями можна стверджувати, що головними недоліками використання електромеханічних змішувачів наведених на (рис. 1.27) та (рис. 1.28), є їх дуже висока вартість, яка пов'язана зі складністю виготовлення обертових вузлів та підведенням електричного живлення, що повинно відповідати пожежним та вибухобезпечним нормам, а також, висока споживана потужність перемішуючого пристрою, зумовлена високою швидкістю обертання та кількістю змонтованих змішувачів у одному біогазовому резервуарі.

1.2.3. Огляд існуючих способів нагріву субстрату в біогазовому реакторі

Переробка біомаси з використанням мікроорганізмів є доволі тривалим та трудомістким процесом. Інтенсифікація якого досягається шляхом підбору технологічних параметрів, таких як, температура зброджуваної маси, кислотність, концентрація, об'єм поживних речовин [118].

З наведених технологічних параметрів найбільш впливовим чинником є температура. Її зростання призводить до швидшого розкладу органічних речовин, а раптове падіння – зменшує метаболічні процеси, а разом з тим вихід біогазу [120].

Наведені в працях [78, 119 – 121] відомості щодо впливу температурного режиму на протікання анаеробного процесу суттєво відрізняються в залежності від типу сировини та її фізико-хімічних властивостей. Для рослинних відходів оптимальна температура зброджування 30 – 35 °С, стічних вод – 30 – 40 °С, гною – 37 – 40 °С.

Мезофільний режим бродіння характеризується найвищою активністю метаногенних бактерій з максимальним утворенням біогазу при температурі бродіння 35 °С [78].

Rashed M. B. у роботі [122] у результаті дослідження впливу зміни температури на продуктивність біореактора і життєдіяльність бактерій встановив, що метанові бактерії проявляють свою життєдіяльність при температурі від 0 до 70°C. У [111] було встановлено, що різке зниження або різке підвищення температури створює тривожну дію на бактерії, що призводить до зменшення виходу біогазу. Таким чином, зі зростанням температури підвищуються вимоги до допустимих меж коливання температури для оптимального газового виділення: психрофільний температурний режим ± 2 °С за годину; мезофільний ± 1 °С за годину; термофільний $\pm 0,5$ °С за годину [122, 123]. Тому температура відіграє важливу роль у кількості та якості біогазу, що виробляється з одного кілограма сухої органічної речовини за час ферментації в біогазовому реакторі.

Оскільки температуру потрібно підтримувати в заданих діапазонах, біогазові установки, які працюють в помірному та холодному кліматі, для безперебійного протікання метанового зброджування, потребують підігріву субстрату. Для забезпечення підігрівання субстрату у біогазових установках використовують два методи підігріву: прямий, за допомогою гарячої води, або пари та непрямий нагрів – через теплообмінник.

Прямий підігрів. Для забезпечення встановленого режиму ферментації

субстрат перемішують з гарячою водою (рис. 1.29), температура води 35 – 40 °С.

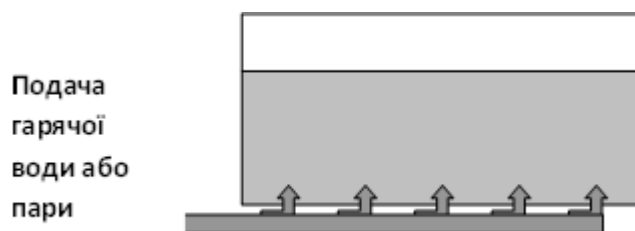


Рис. 1.29. Прямий підігрів субстрату безпосередньою подачею гарячої води або пари

Прямий підігрів паром має ряд суттєвих недоліків. Необхідність установки парогенеруючої системи до складу якої входить очищення води від солей та домішок.. При застосуванні підігріву паром може відбуватися перегрів сировини, а також через високий вміст вологи зменшується якість та кількість утвореного біогазу. Висока вартість системи прямого підігріву субстрату робить її економічно доцільною тільки при використанні у установках великих об'ємів, які переробляють вологі субстрати, такі як стічні води. Оскільки, при прямому підігріві збільшується вологість субстрату, для уникнення зниження ефективності біогазової установки, необхідно додатково встановлювати системи відбору вологи з біогазу, а це призводить до зростання капітальних витрат.

Непрямий підігрів. Непрямий підігрів здійснюється за допомогою теплообмінників, які розташовуються в залежності від форми реактора, типу перероблюваної сировини та способу експлуатації установки, всередині або зовні реактора.

В якості нагрівальних елементів застосовують теплообмінники у вигляді змійовиків, секцій радіаторів, паралельно зварених труб, шлангів та плоских теплообмінників, де теплоносієм служить гаряча вода з температурою близько 60 °С. Використання більш високих температур теплоносія підвищує ризик налипання частинок субстрату на поверхню теплообмінника, що призводить до зниження тепловіддачі. З метою уникнення процесу налипання та осідання твердих частинок субстрату на теплообмінних апаратах, останні рекомендують

встановлювати максимально близько до перемішуючих пристроїв.

Останнім часом найбільшого розповсюдження набули системи підігріву з вмонтованими в стінки біогазового реактора електричними підігрівачами (рис 1.30) [79, 124].

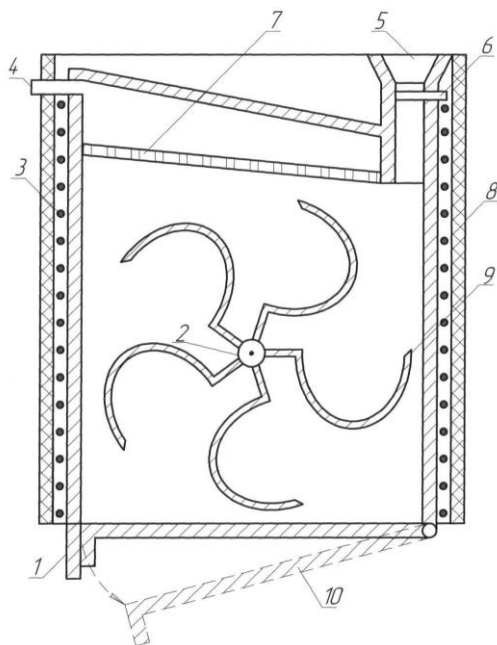


Рис. 1.30. Біогазовий реактор з вмонтованим підігрівачем у стінки реактора: 1 – резервуар; 2 – вал; 3 – нагрівач; 4 – штуцер відведення біогазу; 5 – бункер завантаження; 6 – засувка; 7 – захисна газорозподільна решітка; 8 – теплоізоляційний каркас; 9 – змішувач; 10 – рухоме дно.

Використання підігріву наведеному на (рис. 1.30) не доцільно використовувати, оскільки площа підігріву знаходиться між субстратом та навколишнім середовищем, через що, частина теплової енергії одразу витрачається на втрати у навколишнє середовище, як наслідок, кількість необхідної енергії на нагрівання збільшується. Застосування вбудованого у стінки нагрівача доцільно використовувати у багатокамерних біогазових реакторах, а сам підігрівач розташовується у стінці-перегородці, яка ділить реактор на камери.

Зовнішній обігрів який складається з теплообмінника змонтованого на зовнішній поверхні стінок біогазового реактора необхідно застосовувати тільки у поєднанні з примусовим перемішуванням субстрату. Однак, така система має такі ж недоліки, як і система наведена на рис. 1.30.

Найпоширенішою системою підігріву є система опалення і водонагрівуючого котла, який працює на біогазі, електриці або твердому паливі (рис. 1.31).

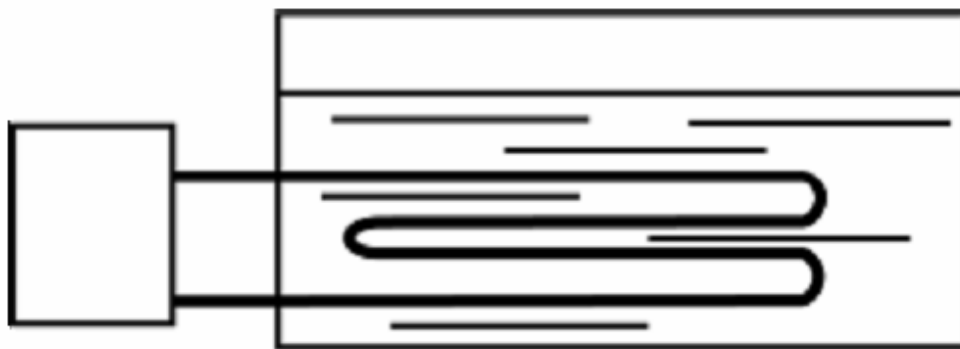


Рис. 1.31. Підігрів сировини за допомогою водонагрівуючого котла

В якості нагрівальних елементів використовують теплообмінники у вигляді змієвиків, де теплоносієм є гаряча вода температурою 60 °С. Під час монтування системи опалення важливо забезпечити умови необхідні для природної циркуляції води в системі. Для цього подачу гарячої води виконують у верхню точку системи і повернення охолодженої у нижню точку. Для контролю температури необхідно встановлювати датчики температури або термостати.

Під час монтажу нагрівального теплообмінника у середині біогазового реактора необхідно враховувати міцність теплообмінника та місце його розташування для отримання найбільш ефективного режиму протікання анаеробного процесу.

Зустрічаються також теплообмінні апарати з використанням електричних нагрівальних кабелів, які прокладаються по зовнішній стінці резервуара, вкладаються у стінки [124], вал шнекового перемішуючого пристрою [113], у якості підігрівуючої підлоги розстеленої на підлозі резервуара. Однак, вище розглянуте застосування нагрівального кабелю не призводить до рівномірного розподілення температури по об'єму субстрату. Нагрівальний кабель прокладений на зовнішній поверхні реактора має недолік, а саме, неефективність та велике енергетичне споживання пристроєм підігріву. Розташування такого пристрою для підігріву призводить до великих втрат тепла у навколишнє середовище та суттєву

різницю температури у субстраті. Біля стінки резервуара відбувається перегрівання субстрату, тоді як ближче до середини температура зменшується, це призводить до зниження продуктивності біогазової установки. Недоліком прокладання нагрівального кабелю у валу шнекового перемішуючого пристрою є те, що за рахунок розміщення пристрою підігріву субстрату у середині валу шнекового перемішуючого пристрою відбувається нерівномірне прогрівання субстрату. Через налипання субстрату на вал та лопаті перемішуючого пристрою зменшується тепловіддача від нагрівача, що призводить до порушення технічних вимог анаеробного бродіння [5].

1.3. Математичне моделювання процесів метанового бродіння

Експериментальні та теоретичні дослідження процесів метанового бродіння почалося ще з 50-х років минулого століття, А. М. Buswell, Н. F. Mueller [125]. Математичні моделі процесів метанового бродіння еволюціонували з найпростіших до складних моделей [126–131]. На сьогоднішній день для застосування у практичних цілях для інженерних розрахунків найбільшою популярністю користується модель Чена-Хашимото [132], яке є покращеною версією моделі Конто [133]. Модель Чена-Хашимото описує з певними похибками об'ємну швидкість виходу біогазу в залежності від параметрів протікання анаеробного процесу.

Значний вклад у розвиток досліджень процесу метанового зброджування відходів сільськогосподарських та промислових об'єктів внесли Fleming J. G., Gebremedhin K. D., Gooch C., Wu B., Bibeau E. L., Chen S., Шворов С. А., Поліщук В. М., Ратушняк Г. С., Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Кучерук П. П., Кухарець С. М., Голуб Г. А., Заблодський М. М. та інші [76, 134–142].

У вітчизняній літературі математичне моделювання гідродинамічних та теплообмінних процесів представлено у роботах авторів, Пішеніна Н. В., Ткаченко С. Й., Резидент Н. В., Степанов Д. В., Кудряшов С. М., Ратушняк, Г. С., Кощєєв І. А., Лялюк О. Г., Скляр О. Г. та інші [39, 41, 42, 49, 134–138].

Кудряшов С. М. [134] створено математичну модель, яка описує рух субстрату всередині біогазового реактора.

Ткаченко С. Й., та Пішеніна Н. В. [135] займалися розробкою математичної моделі процесу нагріву субстрату.

У роботі Ткаченко С. Й., Степанов Д. В. [136] описано гідродинамічні та теплообмінні процеси у циліндричному реакторі.

Відомі роботи по моделюванню гідродинамічних процесів та теплообміну у біогазовому реакторі. Fleming J. G. [139] розробив тривимірну математичну модель гідродинамічних процесів та теплообміну. Gebremedhin K. D., Gooch C. та інші [140] належить розроблена комплексна математична модель теплообміну для біогазового реактора. На основі розробленої моделі Grebremedhin K. D, Gooch C. та іншими, науковці Wu B. та Vibeau E. L. [141] розробили тривимірну модель яка описує процес теплового перенесення у біогазових реакторах, які працюють у холодних кліматичних умовах.

Wu B. та Chen S. [142] розробили тривимірну математичну модель гідродинаміки у біогазовому реакторі з турбулентним потоком органічного субстрату.

Велику цікавість викликає моделювання гідродинамічних процесів у біогазовому реакторі та теплообмінні процеси під час перемішування. Аналіз проблеми показав, що перемішування разом з підігріванням органічного сільськогосподарського та побутового субстратів є основними параметрами підвищення ефективності процесу анаеробного бродіння. Застосування комбінованого пристрою для перемішування та підігріву субстрату дозволяє підтримувати раціональні гідродинамічні та температурні параметри для життєдіяльності та функціонування метаноутворюючих бактерій протягом технологічного процесу.

Питанням дослідження впливу процесу перемішування займалися багато як вітчизняних так і закордонних вчених Скляр О. Г., Скляр Р. В., Закоморний Д. М., Червоний І. Ф., Куріс Ю. В. та інші [49, 87–92].

Велика група вчених Harasek M., Horvath A., Weichselbaum W., Jordan C.,

Maier C., Schlerka M., Pohn S., Kamarad L. та інші [143, 144] займалися дослідженням моделювання процесів гідродинаміки у момент механічного перемішування субстрату у біогазовому реакторі при ламінарному, турбулентному та перехідному режимах.

У 2011 році вченими Mandrea L., Baran G., Casanau S. [145] було отримано аналітичне вирішення для дослідження ламінарного потоку у біогазовому реакторі циліндричної форми з механічним перемішуванням.

Vesvikar, Al-Dahhan та інші [146–149] досліджували тривимірне та стаціонарне моделювання для з'ясування картини потоків субстрату у біогазовому реакторі при барботажному перемішуванні.

Bortman D., Latha S., Sleing P. [150] розробили тривимірну математичну модель гідродинамічного процесу при турбулентному режимі з використанням барботажного перемішування.

З метою оптимізації процесу анаеробного бродіння групою авторів розроблені математичні моделі для біогазових реакторів у яких використовується гідравлічне перемішування [151–153].

Montanana V. F., Martinez T. M., Mendoza A. M. у своїх роботах [151] представили числові результати розподілу полей швидкості у циліндричному біогазовому реакторі при використанні гідравлічного перемішування. Моделюванням гідравлічного перемішування у біогазових реакторах горизонтального типу займаються вчені Aleksandra Berbeć, Andrzej G. Chmielewski [152].

У роботах Komatsu K., Goel R., Terashima M. та інших [153] розглянуті моделі гідродинаміки для органічних субстратів, процеси теплообміну під час гідравлічного перемішування стічних вод.

Проведений аналіз математичних моделей процесу анаеробного зброджування субстрату показав, що врахування теплових та гідродинамічних характеристик є необхідною умовою для оцінки та опису параметрів процесу бродіння органічних субстратів у біогазовому реакторі та визначення енергоефективності для процесів інтенсифікації біогазового виробництва.

1.4. Огляд існуючих систем автоматичного керування перемішуванням та підігрівом субстрату

Автоматизація технологічних процесів – це етап комплексної механізації, яка частково або повністю звільняє людину від безпосереднього виконання функцій керування технологічними процесами. Під час автоматизації технологічних процесів всі етапи отримання, передавання, перетворення та використання сигналів з датчиків, енергії та інформації виконується автоматично за допомогою спеціальних технічних засобів, мікроконтролерів та систем управління.

За останні роки, біогазові технології набули широкого розповсюдження у всьому світі. Поряд з розвитком будь-якого технологічного процесу починається удосконалення його за рахунок введення автоматичних систем контролю та керування.

На сьогоднішній день важко уявити такий технологічний процес, у якому не використовувалася система автоматичного контролю або керування, біогазові комплекси не виняток. По-перше, біогазові комплекси являються вибухопожежо-небезпечними об'єктами, по-друге, складність протікання анаеробного процесу, яка обумовлена великою кількістю параметрів, що впливають на життєдіяльність метаноутворюючих бактерій, підштовхує науковців з усього світу постійно шукати нові способи, системи та методи для автоматичної стабільної підтримки параметрів у заданих межах.

Завдяки автоматизації технологічного процесу біогазових комплексів можна отримати стабільний вихід біогазу із постійним великим вмістом метану.

Основними параметрами, які необхідно регулювати у процесі метаноутворення у біогазовому реакторі, є:

- підтримка температури на встановленому рівні;
- підтримка рівня кислотності;
- тривалість та кількість перемішувань на добу;
- швидкість перемішування;

- вмикання та вимикання системи підігріву та перемішування.

Це не весь перелік параметрів, які необхідно підтримувати у процесі метаноутворення у біогазовому реакторі. Також важливими параметрами є концентрація домішок, контроль тиску у середині біогазового реактора, вологість сировини та інше, але згідно з метою дисертаційної роботи, дані параметри не досліджуються.

Головними вимогами до автоматичних систем контролю та керування є:

- надійність;
- точність;
- висока ефективність;
- мала енергетична споживаність.

Автоматизація виробництва підвищує надійність та продовжує термін роботи обладнання, підвищує безпеку протікання технологічного процесу, скорочує матеріальні витрати та економить енергетичні ресурси, збільшує кількість та якість продукції, тим самим приносячи матеріальний прибуток.

У роботах вітчизняних та закордонних науковців у галузі управління процесами виробництва енергії із нетрадиційних джерел склалося стійке уявлення про процес керування виробництвом біогазу із субстратів. Розробками систем автоматичного керування процесами біогазового та інших виробництв займається велика кількість вчених з усього світу [154–164], серед яких: Єсілевський В. С., Дядюн С. В., Кузнєцов В. М., Porteiro E., Russell R. B., Norvig P., Gopoluni R. B., Шворов С.А. та інші.

Для автоматизації технологічного процесу виробництва біогазу вирішальну роль відіграють інформаційні потоки, що формують зворотні зв'язки відповідно до параметрів, котрі впливають на процес автоматизації, таким чином отримуємо замкнуту систему автоматизації. Саме зворотні зв'язки у поєднанні із елементами системи автоматики відіграють основну роль у якості автоматизації технологічних переходів процесу зброджування субстратів у біогазових реакторах.

Існує безліч компаній та підприємств, які займаються виробництвом

програмного забезпечення, технологій та систем керування для підтримки параметрів на встановленому рівні. Однією з новітніх технологій є Landia GasMix – це система перемішування, яка заснована на процесі переробки субстрату через гідравлічний насос-подрібнювач та спеціальний інжекторний пристрій. Винахідники системи Landia GasMix стверджують, що насос-подрібнювач та спеціальний інжекторний пристрій за рахунок подрібнення субстрату забезпечується однорідність переробки, та як наслідок збільшення утворення біогазу. Система Landia GasMix керується автоматичними електричними та пневматичними клапанами, що дозволяє оператору контролювати та підлаштовувати процес перемішування в залежності від типу установки. Недоліком такої системи є наявність насоса-подрібнювача, оскільки, як відомо з досліджень вітчизняних та зарубіжних вчених, гідравлічне перемішування призводить до розбиття колоній бактерій.

Наступним підходом до реалізації завдань автоматичного управління процесами у біогазових установках є побудова алгоритму керування на базі пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів. Простота таких регуляторів дозволяє досить швидко розробити систему автоматичного керування, проте, з іншого боку обмежується діапазоном об'єктів, якими вони можуть управляти у встановлених діапазонах точності. Досягнення та підтримка оптимального кількісного виходу біогазу залежно від температурного режиму можливо реалізувати за допомогою застосування екстремального керування, тобто знаходження екстремуму статичної характеристики об'єкта керування за експериментальними або статистичними даними, розрахованими за емпіричними формулами та з використанням теорії ймовірності.

Більшість існуючих регуляторів різних фірм мають ряд недоліків: один мікропроцесорний пристрій поруч з необхідними функціями має ще ряд тих, які не потрібно використовувати в даному технологічному процесі. Такі прилади більші за розмірами та ще й коштують дорожче через поєднання великої кількості функцій. В іншому випадку, у одному приладі не закладені всі параметри, які необхідно підтримувати у технологічному процесі, що призводить до купівлі двох

і більше мікропроцесорних пристроїв, що також є економічно невигідним. Оскільки точність підтримання параметрів повинна бути на високому рівні, відсоток похибки – низьким, тому такі пристрої існують в невеликих серіях та коштують дуже дорого.

Існує безліч літератури по ідентифікації об'єктів та систем автоматичного управління технологічними процесами. Більша кількість досліджень зосереджена на описі моделей та контролю за допомогою лінійних рівнянь і відрізняються між собою лише параметром, котрий потребує регулювання.

В теперішній час у більшості досліджень автоматичних систем будь-яким технологічним процесом приділяється увага використанню нелінійних систем, серед яких ключову роль відіграє використання нейронних мереж [154–159]. Вони відрізняються від інших методів, оскільки спрощують процес моделювання та дають використовувати єдиний інструмент для розробки широкого спектру класів систем управління технологічними процесами. Більшість типів нейронних мереж це системи простих елементів обробки – нейронів, що з'єднуються між собою через набір синапсів. Функція що виконується нейронною мережею визначається її архітектурою, шкалою функцій котрі виконують нейрони.

У роботах Russell S. J., Norvig P., Riedmiller M. та інших [160, 161] описується адаптивна система, яка навчається приймати рішення. Використовуючи випадково вибрані дії та накопичений «досвід» адаптивна система розробляє прогностичну модель керування. Для оцінки роботи такої системи використовують зворотні зв'язки, сутність яких полягає у відокремленні негативних дій системи від необхідних [160–162]. У роботі Єсілевського В. С., Дядюна С. В., Кузнецова В. М. [163], відмічено, що нейронні мережі ефективно використовувати у динамічних системах, для яких неможливо створити традиційну модель керування. Що стосується процесу інтенсифікації біогазового виробництва, а саме процесу перемішування та термостабілізації, то дані процеси мають фіксовані значення та потребують побудови чітко сформованої моделі, котра буде працювати по наперед заданому алгоритму дій та підтримувати встановлені параметри.

Висновки по розділу та завдання досліджень

За результатами проведеного аналізу існуючих конструктивних та технологічних параметрів біогазових установок, систем автоматичного керування перемішуванням та підігрівом субстрату, конструкцій перемішувачів і існуючих способів нагріву субстрату у біогазових реакторах, а також наукових досліджень з літературних джерел, зроблено наступні висновки:

- проведений огляд наявних недоліків у системах перемішування та підігріву субстрату показав, що підвищення енергоефективності цих процесів напряму залежить від вибору раціональних масо-габаритних характеристик систем перемішування та підігріву, варіантів поєднання обох процесів у один об'єкт та забезпечення рівномірного розповсюдження теплових потоків по об'єму субстрату, який знаходиться у біогазовому реакторі;
- існуючі методи розрахунку систем перемішування не вміщують у собі пошук раціонального енергетично ефективного рівня швидкості перемішувача з точки зору картини траєкторії переміщення елементарних об'ємів та швидкостей потоків субстрату;
- проведений аналіз математичних моделей процесу анаеробного зброджування субстрату показав, що врахування теплових та гідродинамічних характеристик є необхідною умовою для оцінки енергетичної ефективності процесів перемішування та підігріву субстратів у біогазовому реакторі;
- проведений аналіз систем автоматичного керування технологічними процесами показав, що нейронні мережі економічно використовувати у динамічних системах, для яких неможливо створити традиційну модель керування. Процеси перемішування та термостабілізації субстрату мають фіксовані значення та потребують побудови моделі, яка працюватиме по наперед заданому алгоритму дій та підтримувати встановлені параметри.

Виходячи з проведеного аналізу, поставлені завдання, які необхідно вирішити в роботі:

- провести огляд наукових робіт у напрямку зменшення енерговитрат

на процеси перемішування та електричного підігріву субстрату у біореакторі;

- обґрунтувати доцільність зменшення енергетичних витрат на процеси перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі за рахунок поєднання їх у електротепломеханічну систему;

- побудувати математичну модель динаміки зміни енергетичних витрат на процеси термостабілізації об'єму субстрату при підігріві електричним нагрівальним кабелем розміщеним у лопатях двоярусної мішалки;

- проаналізувати типи механічних перемішуючих пристроїв та обрати енергоефективну конструкцію мішалки для створення електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву;

- проаналізувати картини траєкторій переміщення елементарних об'ємів, швидкостей потоків субстрату у трьохвимірному просторі;

- визначити енергетично ефективний рівень швидкості перемішуючого органу електротепломеханічної системи, що забезпечує раціональні траєкторії переміщення елементарних об'ємів швидкостей потоків субстрату, значення теплових потоків і коефіцієнтів тепловіддачі;

- розробити, виготовити та випробувати експериментальний зразок біогазового реактора з електротепломеханічною системою для перемішування та підігріву субстрату;

- визначити експериментальним шляхом енергетичні характеристики електротепломеханічної системи за різного значення температури навколишнього середовища. Дослідити час охолодження субстрату та об'єктів у біореакторі.

- розробити рекомендації щодо реалізації процесів інтенсифікації анаеробного зброджування у біогазовому реакторі з використанням електротепломеханічної системи підігріву та перемішування.

Вирішення вище перелічених завдань, дозволить знизити енергетичні витрати на процеси перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі, забезпечить підтримку раціональних гідродинамічних та температурних параметрів протягом технологічного процесу, підвищить рентабельність біогазового виробництва.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ЗАГЛИБНОЇ ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ ТА ПІДГРІВУ СУБСТРАТУ

2.1. Основні положення

На сьогоднішній день, зброджування органічних відходів сільського господарства у біогазових реакторах є одним із самих екологічних та економічно вигідних рішень для отримання енергії із відходів у вигляді біогазу. Поряд з цим, побічним ефектом зброджування органічних відходів є отримання цінних екологічно чистих добрив. Утворення біогазу є складним технологічним процесом, оскільки у процесі метаногенезу необхідно забезпечувати підтримку штучно створених параметрів мікроклімату.

Роботи вітчизняних та зарубіжних дослідників направлені на встановлення основних факторів, котрі впливають на процес утворення біогазу, теоретичні та експериментальні обґрунтування раціональних умов для протікання процесу метаноутворення [71, 78, 111, 122, 165–167].

Головними факторами, які впливають на процес анаеробного зброджування є кислотність, температурний режим та однорідність субстрату у біогазовому реакторі.

Оскільки, у процесі анаеробного зброджування на поверхні органічного субстрату відбувається утворення кірки, що створює перешкоду для вивільнення бульбашок біогазу із об'єму субстрату, необхідною умовою є його перемішування.

У зв'язку з необхідністю підтримки температурного режиму анаеробного зброджування у біогазових технологіях використовують підігрівачі. Існуючі на сьогоднішній день засоби підтримки температурного режиму у біогазовому реакторі не є достатньо енергоефективними.

Використання нагріву за допомогою води, потребує великої кількості

додаткового обладнання і енергії для підігріву та постачання нагрітої води по трубопроводам до біогазового реактора. При цьому великі відстані створюють додаткові втрати теплоти у навколишнє середовище.

Підігрів за допомогою занурених у об'єм субстрату електричних трубчастих нагрівачів, є більш ефективним у порівнянні з водяним підігрівом, однак дослідженнями вчених доведено, що на поверхні пристроїв, які знаходяться у об'ємі субстрату, відбувається налипання твердих часточок, що призводить до створення додаткового опору проходженню теплового потоку, зменшує рівномірність прогріву субстрату та знижує вихід біогазу. Однак, використання такого підігрівача у поєднанні з перемішуючим пристроєм створює велику металоємність у об'ємі біогазового реактора, суттєво зменшує корисний об'єм та вміст субстрату.

Підігрів за допомогою електричного нагрівального кабелю, розміщеного на зовнішній стінці біогазового реактора, уникає прямого впливу забруднюючого шару, однак частина теплоти, котра виділяється у наслідок протікання електричного струму, віддається одразу у навколишнє середовище, що знижує коефіцієнт корисної дії такого підігрівача та підвищує споживання електричної енергії.

Отже, створення енергоефективної заглибної електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату є актуальним питанням підвищення ефективності протікання анаеробного процесу, продуктивності та рентабельності біогазового виробництва.

2.2. Визначення енергетичних витрат, необхідних для перемішування субстрату у біогазовому реакторі

Субстрат у біогазовому реакторі в процесі анаеробного бродіння має властивість розділятися на фракції. На дні реактора відбувається скупчення важких частин у вигляді осаду, легкі частини сировини за допомогою бульбашок газу піднімаються на поверхню сировини, утворюючи шар кірки. Середина між

кіркою та осадом заповнена рідкою частиною субстрату. Це має суттєвий вплив на інтенсивність вироблення біогазу.

Одним з основних методів інтенсифікації біогазового виробництва є перемішування субстрату у процесі анаеробного бродіння [1, 71, 78, 109]. Перемішування – це процес переміщення частинок з метою рівномірного розподілення їх по всьому об'єму. Саме процес перемішування субстрату забезпечує рівномірне розподілення сировини по всьому об'єму біогазового реактора та ефективне газовиділення, зменшуючи кількість осідання поживних речовин у вигляді осаду.

Мета перемішування субстрату у біогазовому реакторі [4, 8, 71]:

- руйнування кірки на поверхні субстрату;
- подрібнення крупних фракцій та збільшення середніх і малих часточок органічної маси;
- змішування свіжого субстрату та популяції бактерій (однорідна консистенція);
- забезпечення відсутності порожнин та розшарування субстрату на тверду та рідку фракції;
- забезпечення рівномірного розподілу температурних полів по всьому об'єму субстрату.

Таким чином, на підставі вище зазначеного можна виділити основне завдання застосування перемішування субстрату у процесі анаеробного бродіння, яке полягає у створенні однорідного розчину з однаковою температурою, кислотністю та іншими фізико-хімічними складовими у будь-якій точці об'єму.

При виборі типу перемішуючого пристрою особливу увагу приділяють енергетичним витратам, які залежать від багатьох умов. Визначення потужності, необхідної для механічного перемішування, є одним зі складних гідродинамічних завдань.

У робочий період потужність перемішуючого пристрою більшою мірою визначається опором, який створює рідина на площу перемішуючої лопатки. Опір, створений середовищем рухомому у ньому тілу визначається за законом

Ньютона:

$$S = \zeta \cdot F \cdot \frac{\omega^2 \cdot \gamma}{2 \cdot g}, \quad (2.1)$$

де: ζ – коефіцієнт опору, котрий залежить від режиму руху середовища; ω – швидкість переміщення лопаті у середовищі, м/с; γ – питома вага середовища, кгс/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; F – площа проекції лопаті на площину, перпендикулярну до напрямку переміщення, м²;

$$dF = dx \cdot h, \quad (2.2)$$

де: dx – елемент лопаті розміщений на відстані x від осі обертання, м; h – висота проекції лопатки на середовище, що переміщується, м.

Розглядаючи певний елемент лопаті (рис. 2.1) розміщений на відстані x від осі обертання, можна визначити робочу потужність (dN_p) необхідну на подолання опору середовища рухомій лопаті:

$$dN_p = dS \cdot \omega, \quad (2.3)$$

де dS , для двох лопатей:

$$dS = 2 \cdot \zeta \cdot dF \cdot \frac{\omega^2 \cdot \gamma}{2 \cdot g}, \quad (2.4)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot x, \quad (2.5)$$

де: n – частота обертання лопаті, об/с;

x – відстань від осі обертання до елементу лопаті dx , м.

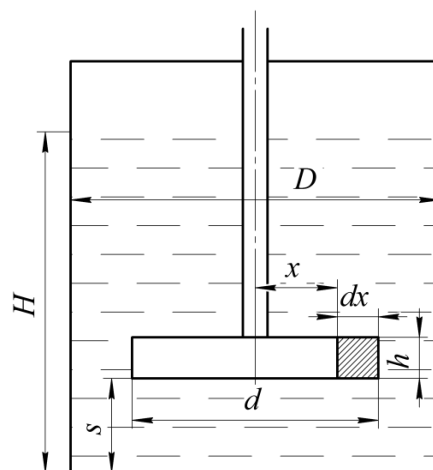


Рис. 2.1. Схема лопатевої мішалки

Підставивши (2.2, 2.4 та 2.5) у (2.3) отримаємо наступне рівняння:

$$dN_p = \frac{(2\pi)^3 \cdot \gamma \cdot \zeta \cdot n^3 \cdot h \cdot x^3 \cdot dx}{g}, \quad (2.6)$$

Провівши інтегрування (2.6) у межах $x=0 \dots r$, отримаємо:

$$N_p = \frac{(2\pi)^3 \cdot \gamma \cdot \zeta \cdot n^3 \cdot h}{g} \int_0^r x^3 \cdot dx, \quad (2.7)$$

або

$$N_p = \frac{(2\pi)^3 \cdot \gamma \cdot \zeta \cdot n^3 \cdot h \cdot r^4}{g \cdot 4}, \quad (2.8)$$

Підставивши у (2.8) замість радіусу лопаті r , її діаметр d , прийmemo $h=a \cdot d$, при цьому, a – відношення висоти лопаті до її діаметра, питому вагу (γ) заміниmo густиною речовини (ρ). Склавши усі множники у один множник (k) отримаємо:

$$N_p = k \cdot \zeta \cdot d^5 \cdot n^3 \cdot \rho \quad (2.9)$$

де,

$$k = 3,87 \cdot a \quad (2.10)$$

Із (2.9) виходить:

$$k \cdot \zeta = \frac{N_p}{\rho \cdot d^5 \cdot n^3} \quad (2.11)$$

Таким чином, (2.11) є критерієм гідродинамічної подоби Ейлера (Eu_m) який у свою чергу залежить від режиму руху речовини, що перемішується, оцінка якого виконується на основі відцентрового критерію Рейнольдса, що є безрозмірною комплексною величиною:

$$Re_m = \frac{\rho \cdot n_c \cdot d^2}{\mu}, \quad (2.12)$$

де: Re_m – модифікований критерій Рейнольдса для перемішування; ρ – густина субстрату, $кг/м^3$; n_c – частота обертів мішалки, $об/с$; d – діаметр мішалки, $м$; μ – динамічна в'язкість субстрату, $Па \cdot с$.

Частота обертів мішалки за секунду (n_c), розраховують за формулою:

$$n_c = \frac{n}{60} \quad (2.13)$$

Залежність між величинами критерію Ейлера та числа Рейнольдса встановлюється експериментальним шляхом та може бути виражена [8]:

$$Eu_m = A / Re_m^m, \quad (2.14)$$

де: A та m – встановлені експериментальним шляхом константи для різних типів мішалок.

У літературі [168] наведено експериментальні дані залежності критерію

Ейлера від критерію Рейнольдса у вигляді кривих $Eu_m = f(Re_m)$, або у вигляді констант A та m для різноманітних конструкцій механічних мішалок.

У випадку, коли спроектована мішалка відрізняється геометричними співвідношеннями від модельної мішалки, для якої встановлено значення констант A та m , тоді розрахований за (2.14) критерій Ейлера повинен включати поправочні коефіцієнти f_i . Поправочні коефіцієнти розраховуються за наступними формулами [8]:

$$f_1 = \left(\frac{D}{\alpha \cdot d} \right)^a, \quad f_2 = \left(\frac{H}{D} \right)^c, \quad f_3 = \left(\frac{h}{\beta \cdot d} \right)^e, \quad f_4 = \left(\frac{s}{d} \right)^r, \quad f_5 = 1,2...1,5, \quad (2.15)$$

де: α – відношення (D/d) для модельної мішалки; β – відношення (h/d) для модельної мішалки; D – діаметр реактора, м; H – висота шару речовини у реакторі, м; h – висота лопаті, м; s – відстань від нижньої частини лопаті до дна реактора, м; a, c, e, r – постійні величини; f_5 – коефіцієнт шорсткості поверхонь лопаті та стінок реактора $f_5 = 1,2...1,5$.

Таким чином, критерій Ейлера для спроектованої мішалки знаходиться за формулою:

$$Eu'_m = Eu_m \cdot \sum(f_i), \quad (2.16)$$

Під час пуску мішалки в рух енергія витрачається не тільки на подолання тертя, а також на подолання сил інерції, за рахунок яких рідина виводиться зі стану спокою. Однак пускова потужність (N_n) витрачається протягом короткого часу. Відповідно до цього розраховується робоча потужність (N_p), за якою вибирається електродвигун з врахуванням можливості збільшення моменту на валу електродвигуна протягом короткого часу.

Робоча потужність мішалки:

- для модельної:

$$N_p = Eu_m \cdot n^3 \cdot d^5 \cdot \rho, \quad (2.17)$$

- для спроектованої:

$$N_p = Eu'_m \cdot n^3 \cdot d^5 \cdot \rho, \quad (2.18)$$

Потужність електродвигуна вибирається за робочою потужністю мішалки (2.17 або 2.18) при врахуванні коефіцієнту корисної дії передачі (η_n) та коефіцієнту запасу потужності ($k = 1,2...1,5$):

$$N_{\partial\partial} = k \frac{N_p}{\eta_n}, \quad (2.19)$$

Початкові моменти руху перемішуючих пристроїв супроводжуються великими енергетичними витратами, котрі залежать як від фізико-хімічних параметрів речовини та рівня заповнення реактора, так і від геометричних розмірів перемішуючого пристрою та реактора, швидкості обертання мішалки. Подальше перемішування речовин у замкнених об'ємах супроводжується появою зустрічних потоків, котрі виникають внаслідок відбиття рідини від стінок реактора. Такі потоки викликають підвищення енергетичних витрат на процеси перемішування. Слід зауважити що, швидкість зустрічних потоків залежить від швидкості перемішуючого пристрою, оскільки під час відбиття речовини від стінок реактора частина енергії потоку втрачається внаслідок відбиття. Відповідно, чим більше енергії передано потоку від перемішуючої лопаті, тим більша швидкість зворотного потоку.

У робочий період, потужність механічної мішалки витрачається на подолання сил тертя, тобто на подолання опору, який створює речовина на площу рухомої лопаті. Величина опору речовини розраховується за виразом (2.1).

У початковий момент руху лопатевої мішалки потужність витрачається на подолання сил інерції (N_i) та сил тертя ($N_m = N_p$) середовища з метою його збурення:

$$N_n = N_i + N_p, \quad (2.20)$$

Визначення потужності необхідної на подолання інерційних сил речовини залежить від площі лопаті (dF) (2.2), яка за час переміщення (l с) виводить зі стану спокою певний об'єм речовини (dV):

$$dV = dF \cdot \omega, \quad (2.21)$$

де: ω – швидкість переміщення лопаті, (залежність 2.5).

Піднята лопаттю маса речовини (dm):

$$dm = \frac{dF \cdot \omega \cdot \gamma}{g}, \quad (2.22)$$

де: γ – питома вага речовини, $\text{кгс}/\text{м}^3$.

Потужність, витрачену на збурення піднятої лопаттю маси речовини з врахуванням значення швидкості (2.5) та маси (2.22):

$$dN_i = \frac{(2\pi)^3 \cdot \gamma \cdot n^3 \cdot h \cdot x^3 \cdot dx}{2g}, \quad (2.23)$$

Провівши інтегрування (2.23) у межах $x=0 \dots r$, отримаємо:

$$N_i = \frac{(2\pi)^3 \cdot \gamma \cdot n^3 \cdot h}{2g} \int_0^r x^3 \cdot dx, \quad (2.24)$$

або

$$N_i = \frac{(2\pi)^3 \cdot \gamma \cdot n^3 \cdot h}{2g} \cdot \frac{r^4}{4}, \quad (2.25)$$

Підставивши у (2.25) замість радіусу лопаті r , її діаметр d , питому вагу (γ) замінимо густиною речовини (ρ) тоді, необхідна потужність для подолання сил інерції речовини у початковий момент руху дорівнюватиме:

$$N_i = 3,87 \cdot h \cdot d^4 \cdot n^3 \cdot \rho \quad (2.26)$$

Оскільки, під час проектування мішалки відношення висоти лопаті до її діаметра може відрізнятися від модельної мішалки, приймемо $\left(\frac{h}{d} = a\right)$, та введемо поправочний коефіцієнт (k):

$$k = 3,87 \cdot a \cdot z, \quad (2.27)$$

де: z – кількість пар лопатей, шт;

тоді,

$$N_i = k \cdot d^5 \cdot n^3 \cdot \rho \quad (2.28)$$

Відповідно до вище зазначеного, підставивши (2.18 та 2.28) у (2.20) отримаємо наступне рівняння для визначення пускової потужності мішалки:

$$N_n = (k + Eu'_m) \cdot d^5 \cdot n^3 \cdot \rho \quad (2.29)$$

2.2.1. Порівняльний аналіз енергетичних витрат від типу використаної механічної мішалки

Для інтенсифікації утворення біогазу при анаеробному зброджуванні субстрату у біогазовому реакторі широкого розповсюдження набув процес перемішування речовини. Адже саме процес перемішування інтенсифікує процеси анаеробного зброджування субстрату у біогазовому реакторі, запобігає появі великої кількості осаду, розшаруванню субстрату на тверді та рідкі фракції з різними фізико-хімічними параметрами, руйнує плаваючу кірку на поверхні субстрату збільшуючи утворення біогазу із органічних відходів, як наслідок, підвищується ефективність біогазової установки.

Найбільш перспективним обладнанням для інтенсифікації процесу анаеробного зброджування субстрату є біогазові реактори із механічними перемішувачами [85, 104, 169].

У літературі [100, 101, 170] наведено результати досліджень, які вказують на ефективність обережного перемішування субстрату у біогазовому реакторі. Обережне перемішування субстрату у процесі анаеробного зброджування з використанням тихохідних механічних перемішувачів забезпечує збереження цілісності колоній бактерій.

Енергетична ефективність біогазового виробництва у першу чергу залежить від споживаної потужності перемішувача та підігрівального пристроїв. Тому, для створення електротепломеханічної системи перемішування та підігріву субстрату у біогазових реакторах, необхідно використати механічну мішалку з найбільш раціональним поєднанням власної площі лопатей та споживаної потужності. Опираючись на інформацію наведену у дослідженнях різних науковців світу [91, 92, 101, 103, 109, 170], найбільш часто у реакторах використовуються тихохідні механічні мішалки, а саме: якірні, рамні та лопатеві різних модифікацій та геометричних форм.

З метою визначення раціонального типу перемішувача пристрою проведено порівняльний аналіз енергетичних витрат для тихохідних механічних

мішалок, при заданих наступних початкових умовах: фізико-хімічні параметри органічного субстрату завантаженого у біогазовий реактор $\rho = 1024 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,048 \text{ Па}\cdot\text{с}$ [166]. Біогазові реактори циліндричної форми з наступними геометричними параметрами: об'єм реактора $V_{\text{реак}} = 5 \text{ м}^3$, висота субстрату у реакторі $H = 2 \text{ м}$, діаметр реактора $D = 1,8 \text{ м}$. Висота від дна реактора до нижньої частини лопатки $s = 0,3 \text{ м}$; діаметр мішалки $d = 1,5 \text{ м}$; висота лопатей $h = 0,2 \text{ м}$; коефіцієнт запасу потужності електричного двигуна $K_{\text{зан}} = 1,3$; коефіцієнт корисної дії передачі $\eta_n = 0,8$; коефіцієнт корисної дії електричного двигуна $\eta_{\text{дв}} = 0,8$.

Критерій Рейнольдса для кожного типу мішалки розраховується за рівнянням (2.12). Підчас дослідження число обертів механічних мішалок було не змінним та становило $n = 60 \text{ об/хв}$.

Коефіцієнти для знаходження числа Ейлера для мішалок [8]: шестилопатевої, лопаті під кутом 90° $A = 12,5$, $m = 0,25$; якірної та рамної $A = 6,2$, $m = 0,25$; лопатевої двоярусної, по дві лопаті на ярус, під кутом 90° $A = 13,6$, $m = 0,2$.

Поправочні коефіцієнти для кожного типу тихохідних механічних мішалок розраховуються за рівняннями (2.15). Постійні величини для тихохідних механічних мішалок, а саме: лопатевої, якірної, та рамної [8] становлять: $a = 1,1$; $c = 0,6$; $e = 0,3$; $r = 0$.

Критерій Ейлера з врахуванням поправочних коефіцієнтів для кожного типу тихохідної механічної мішалки визначається з залежності (2.16).

Потужність електричного приводу тихохідної механічної мішалки (2.19) визначається за робочою потужністю мішалки (2.17 або 2.18).

Результати проведеного порівняльного аналізу представлено у вигляді графічних залежностей, на яких зображено необхідна витрата потужності для електричного приводу тихохідних механічних мішалок різних модифікацій (рис. 2.2).

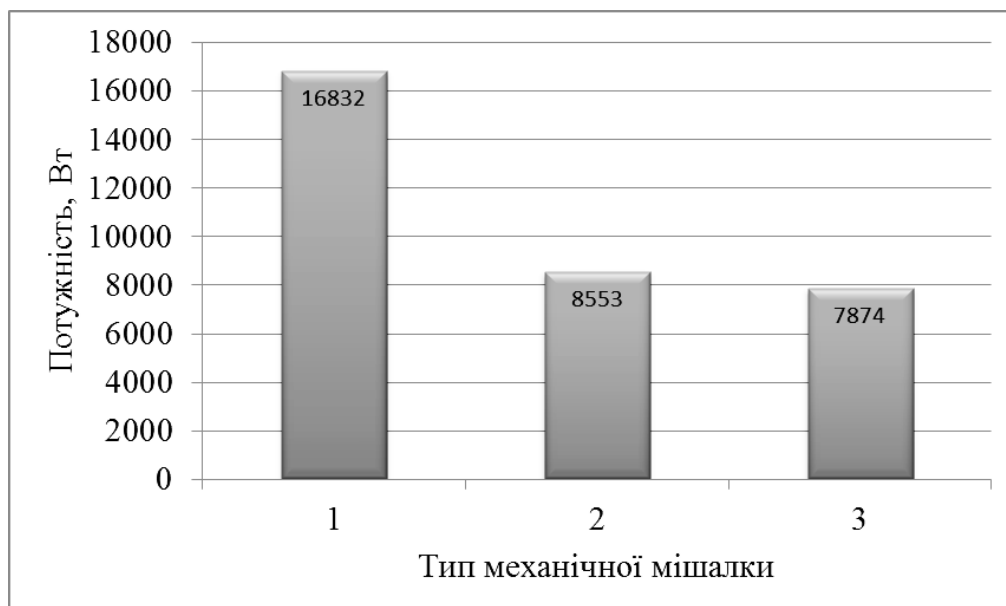


Рис. 2.2. Витрата потужності для електричного приводу механічної мішалки: 1 – Шестилопатева, лопаті під кутом 90^0 ; 2 – Якірна та рамна; 3 – Лопатева двоярусна, по дві лопаті на ярус під кутом 90^0

Проаналізувавши значення витрати потужності для електричних приводів механічних мішалок (рис. 2.2) встановлено, що використання двоярусної лопатевої мішалки, у якої по дві лопаті на ярус, котрі встановлені під кутом 90^0 , потребує найменшої кількості енергії на перемішування субстрату згідно з заданими початковими умовами. Однак, лопатеві механічні мішалки з лопатями, встановленими під кутом 90^0 під час перемішування створюють переважно радіальні потоки, що не дозволяє створити рівномірного збурення переміщуваної речовини у реакторі, тому лопаті мішалки потрібно розміщувати під кутом 45^0 , адже при такому нахилі лопатей разом з радіальними потоками у середовищі, що перемішується створюються також осьові потоки. Вектори розповсюдження потоків речовини для різних конструкцій механічних перемішуючих пристроїв наведено у літературі [7, 22, 91, 100, 106]. Тому, враховуючи результати проведеного порівняльного аналізу та вектори розповсюдження потоків, для створення електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву, у якості перемішуючого пристрою обрано лопатеву двоярусну механічну мішалку з лопатями встановленими під кутом 45^0 .

2.2.2. Визначення енергетично ефективного рівня швидкості перемішувального органу електромеханічної системи

За останні роки, широкого розповсюдження у різних країнах світу (Німеччина, Іспанія, Франція, Бельгія та інші) набувають домашні біогазові установки малого об'єму у яких відбувається анаеробне зброджування побутових харчових відходів. Одним з перших та наразі відомих виробників малих біогазових установок є Home Biogas.

Використання малих біогазових установок, у яких зброджуються побутові харчові відходи дозволяє отримувати біогаз, що у подальшому використовується у власних потребах (приготування їжі, підігрів води, опалення та інше), також ще однією особливістю є те, що використання малих біогазових установок дозволить з економити час та кошти на вивезення та утилізацію побутових харчових відходів. Поряд з цим, перероблені відходи у подальшому можливо використовувати у якості добрив для власних потреб або продажу у фермерські компанії. Малі біогазові установки можливо використовувати, як у приватних будинках так і на різних виробничих та пересувних майданчиках. У якості сировини можна використовувати побутові харчові відходи, гній та подрібнену рослинність.

Враховуючи вище наведені позитивні фактори від використання малих біогазових установок, проведено 3D моделювання для визначення векторів розповсюдження потоків субстрату від швидкості обертання лопатевої двоярусної мішалки з лопатями встановленими під кутом 45^0 , з метою визначення раціональних обертів перемішуючого пристрою для заданого об'єму біогазового реактора [7].

Для створення моделі біогазового реактора з лопатевою двоярусною мішалкою з лопатями встановленими під кутом 45^0 використовувався програмний комплекс SolidWorks. Моделювання процесу перемішування виконувалось за допомогою додатку SolidWorks Flow Simulation [7], використовуючи рівняння Нав'є-Стокса.

Для проведення 3D моделювання задавалися наступні початкові умови: фізико-хімічні параметри органічного субстрату завантаженого у біогазовий реактор $\rho = 1024 \text{ кг / м}^3$, $\mu = 0,048 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

На рис. 2.3, а представлена модель біогазового реактора циліндричної форми з розміщеною по центральній вісі реактора лопатевою двоярусною мішалкою з лопатями, які встановлені під кутом 45° , його геометричні розміри (рис. 2.3 б) та розрахункова сітка біогазового реактора (рис. 2.3 в), верхній рівень якої співпадає з рівнем субстрату у реакторі $H=436 \text{ мм}$. Швидкість обертання лопатевої двоярусної мішалки з лопатями встановленими під кутом 45° прийнято у межах $n = 10 \dots 60 \text{ об / хв}$.

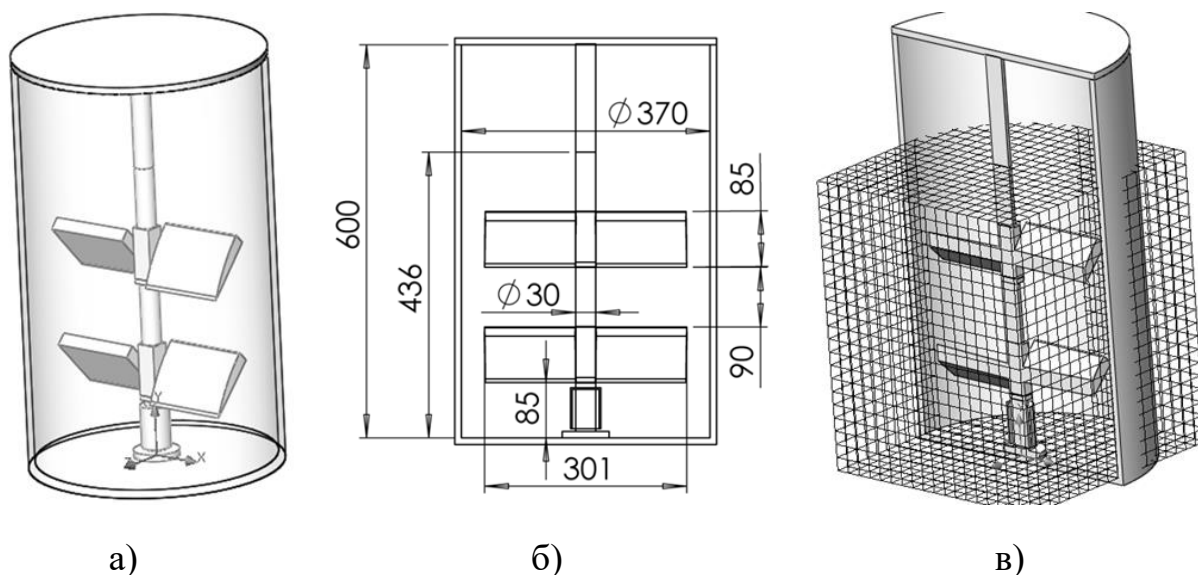


Рис. 2.3. Модель біогазового реактора [7]: а) модель біогазового реактора з лопатевою двоярусною мішалкою з лопатями встановленими під кутом 45° ; б) геометричні розміри біогазового реактора та лопатевої двоярусної мішалки з лопатями встановленими під кутом 45° ; в) розрахункова сітка геометричної моделі біогазового реактора

У результаті проведення 3D моделювання за різної швидкості обертання лопатевої двоярусної мішалки отримано картини траєкторій переміщення елементарних об'ємів та швидкостей потоків субстрату у трьохвимірному просторі (рис. 2.4).

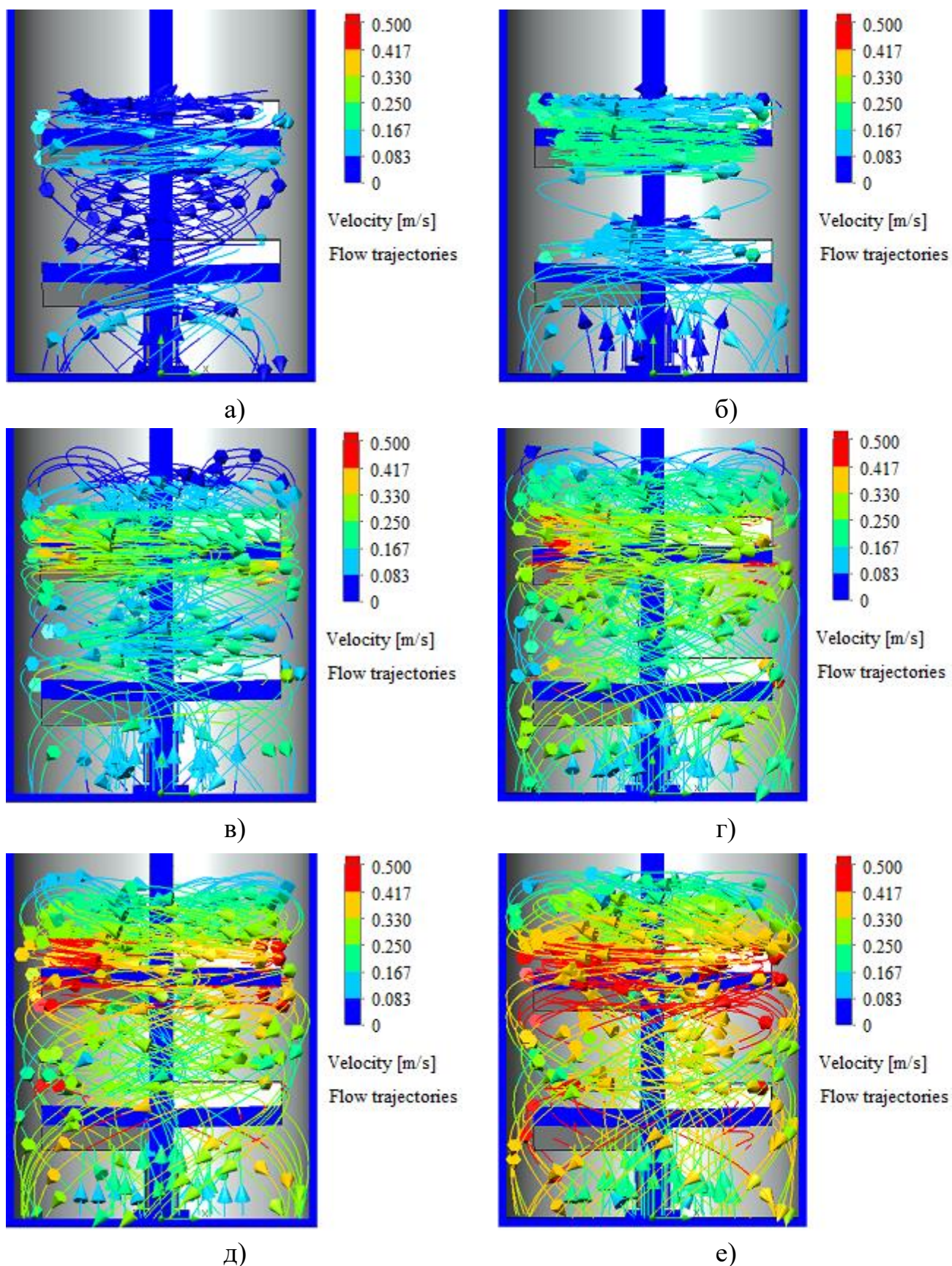


Рис. 2.4. Траєкторії переміщення елементарних об'ємів та швидкостей потоків субстрату за різної швидкості обертання мішалки [7]: а) 10 об/хв; б) 20 об/хв; в) 30 об/хв; г) 40 об/хв; д) 50 об/хв; е) 60 об/хв.

З (рис. 2.4, а та б) видно, що траєкторії переміщення потоків субстрату сконцентровані у центральній частині реактора з явним вираженням скупчення потоків у верхній його частині. Середня швидкість потоків у об'ємі речовини становить 0,066 м/с (рис. 2.4, а) та 0,127 м/с (рис. 2.4, б). При цьому, біля стінок та на дні реактора спостерігаються зони спокою, що вказує на недостатнє перемішування речовини у біогазовому реакторі малого об'єму. При швидкості обертання мішалки 30 об/хв (рис. 2.4, в) переміщення потоків набувають максимальних швидкостей біля лопатей перемішуючого пристрою, проте у верхніх шарах речовини та між ярусами лопатей швидкість потоків набуває значень від 0 до 0,167 м/с, що не дозволяє отримати ефективного процесу перемішування. При цьому, середня швидкість переміщення потоків у об'ємі речовини – 0,176 м/с (рис. 2.4, в) [7].

На основі аналізу рис. 2.4 а, б, та в зроблено висновок, що для конструкції перемішуючого пристрою, яка наведена на (рис. 2.3), частота обертання, що не перевищує 30 об/хв, не дозволяє отримати ефективного перемішування речовини у біогазовому реакторі малого об'єму.

При швидкості обертання мішалки 40 об/хв (рис. 2.4, г) переміщення потоків набувають максимальних швидкостей біля країв лопатей перемішуючого пристрою. При цьому, у верхніх шарах речовини та між ярусами лопатей швидкість потоків у процесі перемішування знаходиться у межах від 0,1 до 0,417 м/с [7].

У нижній частині реактора спостерігаються ділянки інтенсивного підйому речовини із дна реактора, котрі виникають внаслідок появи всмоктувального ефекту, який у свою чергу, виникає внаслідок відцентрових сил під час обертання лопатей мішалки. Підйом речовини з дна реактора забезпечує відсутність ущільнення осаду. Відомо, що ущільнення осаду призводить до зменшення поживних речовин для бактерій і, як наслідок, зниження утворення об'єму біогазу та розкладання органічної речовини. Середня швидкість переміщення потоків у об'ємі речовини становить 0,273 м/с (рис. 2.4, г). Така картина розподілу швидкостей забезпечує встановлення майже однакової швидкості потоків у

всьому об'ємі речовини. Це призводить до рівномірного перемішування речовини у біогазовому реакторі малого об'єму [7].

При швидкості обертання мішалки 50 об/хв (рис. 2.4, д) спостерігається картина переміщення потоків, яка схожа до картини, що наведена на (рис. 2.4, г). Відмінністю є величина швидкості потоків, значення якої складають: у верхній частині реактора від 0,083 до 0,5 м/с; у області між ярусами лопатей від 0,2 до 0,4 м/с та у нижній частині реактора від 0,1 до 0,25 м/с, тоді як середня швидкість переміщення потоків у реакторі – 0,285 м/с (рис. 2.4, д) [7].

При зростанні швидкості обертання мішалки 60 об/хв (рис. 2.4, е) спостерігаються зони високих швидкостей у верхніх шарах речовини, максимальна швидкість яких біля лопатей досягає значень більше 0,5 м/с. У області між ярусами лопатей та у нижній частині реактора, картина потоків схожа до картин наведених на (рис. 2.4 г, д), але з більшими значеннями швидкостей. Середня швидкість переміщення потоків у об'ємі речовини становить 0,335 м/с (рис. 2.4, е) [7].

З метою визначення енергоефективної частоти обертання перемішувального органу електромеханічної системи біогазових реакторів проведені дослідження найбільш навантаженого періоду перемішуючого пристрою, а саме, початкового періоду руху.

Субстрат має в'язку консистенцію, внаслідок цього процес виходу мішалки на номінальну частоту обертання потребує певного проміжку часу, тривалість якого залежить від фізико-хімічного складу субстрату, номінальної частоти обертання, типу та потужності електричного приводу мішалки.

Під час проведення 3D моделювання приймали допущення, що вихід мішалки на номінальну частоту обертання відбувається за лінійним законом, час виходу складає 0,5 с [7]. Отримано масив даних крутного моменту (M , Нм) на подолання лопатями перемішуючого пристрою опору середовища (сил інерції та сил тертя) для різних значень кутової швидкості обертання валу перемішуючого пристрою (ω , рад/с). За допомогою програмного пакету Wolfram Mathematica визначено корисну потужність (P_k), необхідну на подолання опору середовища

лопатями мішалки у початковий період руху. Результати представлено у вигляді графічних залежностей на рис. 2.5.

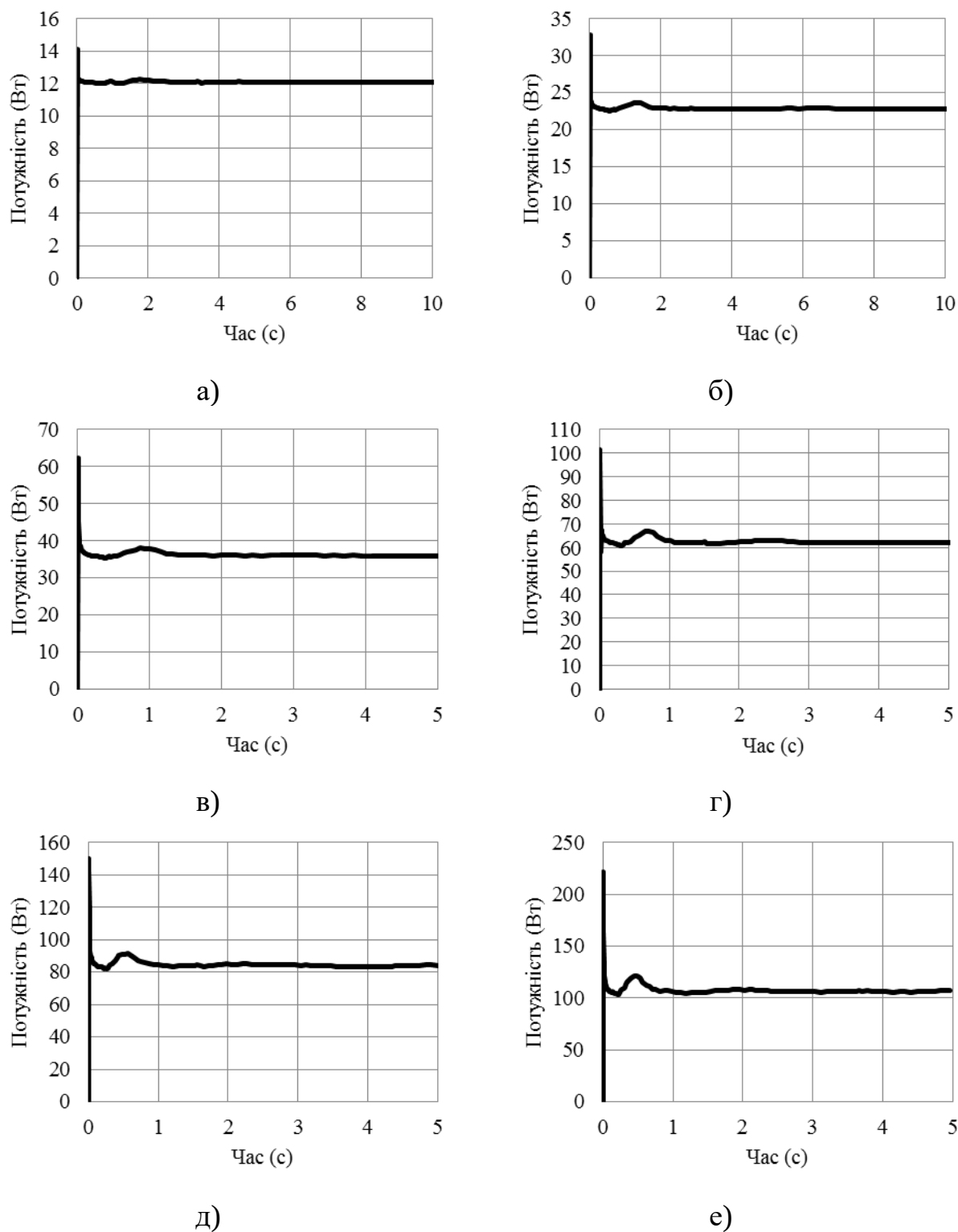


Рис. 2.5. Графіки корисної потужності під час пуску за різної частоти обертання перемішуючого пристрою: а) 10 об/хв; б) 20 об/хв; в) 30 об/хв; г) 40 об/хв; д) 50 об/хв; е) 60 об/хв.

На рис. 2.5 помітно, що у перші секунди пуску системи перемішування відбуваються значні коливання потужності затухаючого характеру. При цьому, пускова потужність електромеханічної системи перемішування більша за усталене значення потужності перемішування [7]. Подібне співвідношення потужностей буде спостерігатися і для значно більших об'ємів біогазових реакторів, для яких, відповідно потрібна значно більша потужність електромеханічної системи. Поява коливань пояснюється фізико-хімічними властивостями речовини, яка на початку перемішування знаходиться у стані спокою, тому перемішувачій системі необхідно подолати інерційні сили для виведення речовини із стану спокою та встановлення направлених потоків, вектори швидкості яких співпадають з векторами швидкості елементів перемішувачої системи. Аналіз результатів (рис. 2.5) показав, що у початковий момент пуску лопатевої мішалки відбувається різке зростання потужності, пікові значення якої складають від 14 до 221 Вт в залежності від частоти обертання. Значення робочої потужності складають від 12 до 105 Вт [7].

Виявлено закономірність, за якою підвищення частоти обертання зменшує тривалість періоду встановлення усталеного значення робочої потужності. Так, при 10 об/хв тривалість перехідного періоду 10 с (рис. 2.5 а), а при 60 об/хв – 4 с (рис. 2.5 е) [7].

Враховуючи виявлену закономірність під час аналізу графічних залежностей і встановлену тривалість перехідного періоду для різної частоти обертання (рис. 2.5), а також рекомендації за результатами досліджень, за якими час одного циклу перемішування субстрату повинен тривати 20 хвилин, визначено енергію, що витрачається на перемішування субстрату за період пуску та один повний цикл перемішування, за формулою [7]:

$$W = \sum (P_k \cdot \Delta t), \quad (2.30)$$

де: P_k – середня потужність у проміжку часу, $Вт$; Δt – одиниця часу, $\Delta t = 0,01 \text{ с}$.

Результати розрахунків наведено на рис. 2.6.

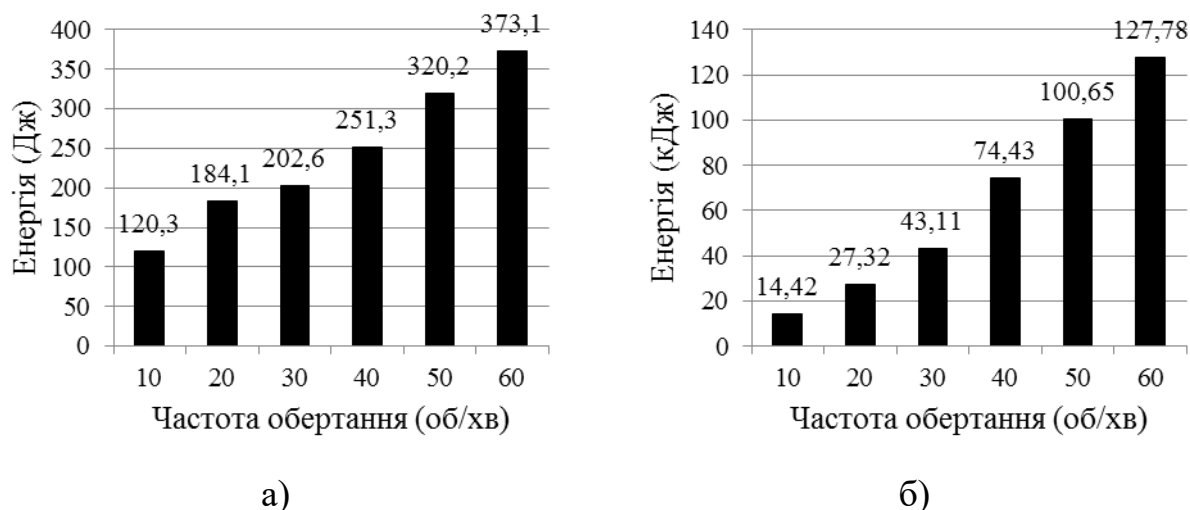


Рис. 2.6. Корисна енергія, що витрачається на перемішування субстрату за різної швидкості обертання перемішуючого пристрою за [7]: а) період пуску; б) один повний цикл перемішування (20 хвилин).

Аналізуючи графічні результати (рис. 2.6) визначено відсоткове значення кількості корисної енергії витраченої у період пуску від корисної енергії, витраченої за один повний цикл перемішування: 10 об/хв – 0,84 %; 20 об/хв – 0,68 %; 30 об/хв – 0,47 %; 40 об/хв – 0,34 %; 50 об/хв – 0,32 %; 60 об/хв. – 0,29 %. Аналізуючи витрату корисної енергії на один повний цикл перемішування (рис. 2.6 б), виявлено, що залежність кількості витраченої енергії при збільшенні частоти обертання робочого органу мішалки, відповідає степеневій функції $P = f(\omega^\alpha)$ [7].

Беручи до уваги отримані графічні результати, представлені на (рис. 2.4, рис. 2.5 та рис. 2.6), а також, відсоткове значення кількості енергії, що витрачається у період пуску, від енергії, що витрачається за весь період перемішування, зроблено висновок, що для лопатевої двоярусної мішалки з лопатями встановленими під кутом 45° , енергетично ефективною частотою обертання є – 40 об/хв [7]. При такій частоті обертання створюються майже однакові за швидкістю потоки речовини у всьому об'ємі (рис. 2.4 г), що забезпечує рівномірне та обережне перемішування субстрату у біогазовому реакторі.

2.3. Рівняння теплового балансу при анаеробному зброджуванні органічного субстрату у біогазовому реакторі

Рентабельність використання біогазових установок безпосередньо залежать від енергоефективності процесу метаноутворення. В свою чергу, енергоефективність біогазової установки залежить від енергетичних витрат необхідних на підтримку постійних теплових процесів анаеробного бродіння, тому одним з основних методів інтенсифікації біогазового виробництва поряд з перемішуванням є підтримка постійної температури субстрату у процесі анаеробного бродіння [23, 71, 78, 79, 111, 113, 122, 167, 169].

На процеси анаеробного бродіння в значній мірі впливає температура, під час зниження або стрімких перепадах якої відбувається зниження біологічних процесів у органічній масі субстрату і, як наслідок, інтенсивності утворення біогазу.

Визначення кількості енергетичних витрат у процесі підтримки температури у біогазовому реакторі є складним завданням, оскільки потік енергії, який необхідний для підтримки температури у встановлених межах залежить від багатьох змінних у часі факторів. Найбільші втрати тепла відбуваються у процесі вивантаження відпрацьованого шламу та розсіювання тепла біореактора у навколишнє середовище. Таким чином, енергетичні витрати на підтримку температури зброджування субстрату доцільно описати рівнянням теплового балансу.

Ліва частина рівняння теплового балансу складається із кількості теплоти необхідної для підтримки теплового режиму у біогазовому реакторі, до якого входить: кількість теплоти, яка знаходиться у субстраті ($Q_{\text{суб}}$); кількість теплоти, виділеної під час анаеробного зброджування субстрату ($Q_{\text{бр}}$); кількість теплоти від нагрівального пристрою для підтримки стабільної температури у біогазовому реакторі ($Q_{\text{нагр}}$); кількість теплоти, яка надходить до субстрату у процесі охолодження нагрівального пристрою ($Q_{\text{ох.н.п}}$) та теплові надходження при завантаженні свіжого субстрату ($Q_{\text{зав.суб}}$) [2].

У правій частині рівняння теплового балансу знаходяться сумарні втрати теплової енергії, які складаються з втрати теплоти у навколишнє середовище ($Q_{\text{навк}}$), втрати під час відведення біогазу ($Q_{\text{біогаз}}$) та у процесі вивантаження відпрацьованого шламу ($Q_{\text{шл}}$).

Рівняння теплового балансу має наступний вигляд [2, 3]:

$$Q_{\text{суб}} + Q_{\text{бр}} + Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{ох.н.п}} + Q_{\text{зав.суб}} = Q_{\text{навк}} + Q_{\text{біогаз}} + Q_{\text{шл}}, \quad (2.31)$$

Кількість теплоти, яка знаходиться у субстраті ($Q_{\text{суб}}$) залежить від температури навколишнього середовища, маси, температури та питомої теплоємності субстрату.

$$Q_{\text{суб}} = f(c_{\text{суб}}, m_{\text{суб}}, t_{\text{суб}}, t_{\text{навк}}), \quad (2.32)$$

Таким чином, кількість теплоти, яка знаходиться у субстраті визначається за формулою:

$$Q_{\text{суб}} = c_{\text{суб}} \cdot m_{\text{суб}} \cdot (t_{\text{суб}} - t_{\text{навк}}), \quad (2.33)$$

де: $m_{\text{суб}}$ – маса субстрату у біогазовому реакторі, кг; $c_{\text{суб}}$ – питома теплоємність субстрату, Дж/(кг·°C); $t_{\text{суб}}$ – температура процесу анаеробного зброджування субстрату у реакторі, °C; $t_{\text{навк}}$ – температура навколишнього середовища, °C.

Кількість утвореної теплоти від бродіння субстрату ($Q_{\text{бр}}$), детально розглянуто у роботах вітчизняних та закордонних авторів. Вони стверджують, що теплота від бродіння виникає внаслідок утворення та підйому біогазових бульбашок. Внаслідок підйому газової бульбашки відбувається механічний рух, який згідно закону тертя перетворюється у теплову енергію та передається субстрату.

У процесі вивантаження відпрацьованого шламу відбувається виведення певної кількості теплоти, яку знаходимо за формулою:

$$Q_{\text{шл}} = c_{\text{шл}} \cdot m_{\text{шл}} \cdot (t_{\text{шл}} - t_{\text{навк}}), \quad (2.34)$$

де: $m_{\text{шл}}$ – маса вивантаженого шламу, кг; $c_{\text{шл}}$ – питома теплоємність вивантаженого шламу, Дж/(кг·°C); $t_{\text{шл}}$ – температура вивантаженого шламу, °C.

Оскільки, згідно з технологічним процесом анаеробного бродіння для

підтримки стабільної кількості виробленого біогазу, біогазовий реактор постійно повинен бути заповнений однаковим об'ємом субстрату, маса вивантаженого шламу відповідає масі завантаженого свіжого субстрату ($m_{зав. суб}$), а кількість теплоти, котра надходить разом із свіжим завантаженим субстратом, описується залежністю:

$$Q_{зав.суб} = c_{зав.суб} \cdot m_{зав.суб} \cdot (t_{зав.суб} - t_{навк}), \quad (2.35)$$

де: $m_{зав.суб}$ – маса завантаженого свіжого субстрату, кг; $c_{зав.суб}$ – питома теплоємність завантаженого свіжого субстрату, Дж/(кг·°C); $t_{зав.суб}$ – температура завантаженого свіжого субстрату, °C.

Певну частину теплоти, відведену із біогазового реактора разом з виділенням біогазу, можна визначити з рівняння:

$$Q_{біогаз} = c_{біогаз} \cdot V_{біогаз} \cdot \rho_{біогаз} \cdot (t_{біогаз} - t_{навк}) \cdot T_б, \quad (2.36)$$

де: $V_{біогаз}$ – об'єм виробленого біогазу, м³/добу; $c_{біогаз}$ – питома теплоємність біогазу, Дж/(кг·°C); $t_{біогаз}$ – температура біогазу, °C; $\rho_{біогаз}$ – питома густина біогазу, кг/м³; $T_б$ – тривалість зброджування, дів.

Об'єм виробленого за добу біогазу знаходимо за формулою:

$$V_{біогаз} = \frac{m_{суб} \cdot (100 - \gamma_{суб})}{100} \cdot b \cdot j, \quad (2.37)$$

де: $m_{суб}$ – маса субстрату у біогазовому реакторі, кг/добу; $\gamma_{суб}$ – вологість субстрату, %; b – вихід біогазу з одиниці органічної речовини, м³/кг; j – ступінь розкладання органічної речовини, %.

Залежність теплових втрат біогазового реактора у навколишнє середовище математично мають наступний вигляд:

$$Q_{навк} = f(k, t_{суб}, t_{навк}, \lambda_{ст}, \delta_{ст}, F, \tau, v_{віт}, \lambda_{із.мат}, \delta_{із.мат}, r_{заб}), \quad (2.38)$$

де: k – коефіцієнт теплопередачі, враховує середню швидкість теплопередачі по всій поверхні теплообміну, Вт/(м²·°C); $t_{суб}$ – температура зброджування субстрату, °C; $t_{навк}$ – температура навколишнього середовища, °C; $\lambda_{ст}$ – коефіцієнт теплопровідності стінки біогазового реактора, Вт/(м·°C); $\delta_{ст}$ – товщина стінки біогазового реактора, м; F – площа поверхні біогазового

реактора, m^2 ; τ – час, s ; $r_{заб}$ – зменшення коефіцієнту теплопередачі при налипанні бруду на внутрішніх стінках біогазового реактора $(m^2 \cdot ^\circ C)/Bm$; $V_{в\dot{и}т}$ – середня швидкість вітру, m/s ; $\lambda_{із.мат}$ – коефіцієнт теплопровідності ізолюючого матеріалу, $Bm/(m \cdot ^\circ C)$; $\delta_{із.мат}$ – товщина ізолюючого матеріалу, m .

Залежність зв'язку між тепловими втратами у навколишнє середовище та поверхнею теплообміну описується законом Ньютона-Ріхмана [3, 171]:

$$Q_{навк} = k \cdot F \cdot \tau \cdot (t_{суб} - t_{навк}), \quad (2.39)$$

У рівнянні (2.39) коефіцієнт теплопередачі (k) залежить від великої кількості факторів, тому його рекомендовано знаходити використовуючи наступну залежність [3, 171]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}} + \frac{\delta_{із.мат}}{\lambda_{із.мат}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.40)$$

де: α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від субстрату до стінки реактора, $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$; α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки реактора в навколишнє середовище, $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

Однак, у процесі зброджування субстрату на внутрішніх стінках реактора утворюється налипання бруду, що спричиняє перешкоду проходженню тепла у навколишнє середовище. Величина цього опору, знаходиться в межах $r_{заб} = 1500 - 6000 (m^2 \cdot ^\circ C)/Bm$ [79], тому, з врахуванням забруднюючого шару, величину коефіцієнта тепловіддачі (2.40) рекомендується розраховувати наступним чином:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}} + r_{заб} + \frac{\delta_{із.мат}}{\lambda_{із.мат}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (2.41)$$

Коефіцієнт тепловіддачі (α_1) від субстрату до стінки біореактора, залежить від швидкості руху речовини у реакторі, діаметру реактора, режиму перемішування (ламінальний або турбулентний), який визначається з

критеріального рівняння Рейнольдса, критерію подібності Прандтля, який враховує вплив фізичних властивостей середовища на тепловіддачу, визначаємо за формулою [2, 6]:

$$\alpha_1 = 1.01 \cdot \frac{\lambda}{d_{\text{вн}}} \cdot (Re_m)^{0.62} \cdot (Pr)^{0.36} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}, \quad (2.42)$$

де: λ – коефіцієнт теплопровідності субстрату, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$; $d_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр реактора, $м$; Pr_p – критерій подібності Прандтля у середині реактора при температурі бродіння; Pr_{cm} – критерій подібності Прандтля при температурі біля стінки реактора; Pr – критерій подібності Прандтля.

$$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda}, \quad (2.43)$$

де: μ – динамічна в'язкість субстрату, $Па \cdot с$.

Оскільки, при рівномірному розподіленні температури по всьому об'єму субстрату, температура біля стінки та у середині реактора буде однакою, внаслідок чого ($Pr_p = Pr_{cm}$) тому, підставивши цю відповідність у (2.42), розрахунок коефіцієнту тепловіддачі від субстрату до стінки реактора (α_1), можна записати у вигляді:

$$\alpha_1 = 1.01 \cdot \frac{\lambda}{d_{\text{вн}}} \cdot (Re_m)^{0.62} \cdot (Pr)^{0.36} \quad (2.44)$$

В залежності від режиму руху речовини, для визначення коефіцієнту тепловіддачі від субстрату до стінки реактора (α_1) можуть бути використані залежності (2.12, 2.42-2.44) та залежності наведені у (Додатку В.1 – В.3).

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки реактора в навколишнє середовище визначаємо за формулою [166, 171]:

$$\alpha_2 = 11.6 + 7 \cdot \sqrt{v_{\text{вн}}} \quad (2.45)$$

Площа тепловіддачі поверхні біогазового реактора складається з площі бічної поверхні ($F_{\text{бічн}}$) та площі верхньої та нижньої частин біогазового реактора, які найбільш часто виконують у вигляді на півсфери ($F_{\text{купол}}$), дані

площі визначають з рівнянь:

Площа бічної поверхні циліндра:

$$F_{\text{бічн}} = 2 \cdot \pi \cdot H \cdot R \quad (2.46)$$

Площа купола, виконаного напівсферою:

$$F_{\text{купол}} = 2 \cdot \pi \cdot R^2 \quad (2.47)$$

Сумарна площа поверхні біогазового реактора:

$$F = F_{\text{бічн}} + F_{\text{купол}} \quad (2.48)$$

де H – висота біогазового реактора, м; R – радіус біогазового реактора, м.

У результаті вищевизначеного, кількість витраченої теплоти на підтримку постійної температури зброджування у біореакторі визначається з рівняння:

$$Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{навк}} + Q_{\text{біогаз}} + Q_{\text{шл}} - Q_{\text{ох.н.п}} - Q_{\text{зав.суб}} \quad (2.49)$$

Електричний нагрівальний пристрій розташовується безпосередньо у об'ємі субстрату, тому у рівнянні теплового балансу необхідно враховувати теплоту від охолодження нагрівального пристрою ($Q_{\text{ох.н.п}}$).

Кількість теплоти виділеної під час охолодження нагрівального пристрою можна визначити з рівняння:

$$Q_{\text{ох.н.п}} = c_{\text{н.п}} \cdot m_{\text{н.п}} \cdot (t_{\text{н.п}} - t_{\text{суб}}), \quad (2.50)$$

де: $m_{\text{н.п}}$ – маса нагрівального пристрою, кг; $t_{\text{суб}}$ – температура процесу анаеробного зброджування субстрату, $^{\circ}\text{C}$; $c_{\text{н.п}}$ – питома теплоємність матеріалу, з якого виконано нагрівальний пристрій, Дж/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$); $t_{\text{н.п}}$ – температура нагрівального пристрою, $^{\circ}\text{C}$.

Розрахувавши необхідну кількість теплоти на підтримку температури у біогазовому реакторі за залежністю (2.49), можна визначити потужність електричних нагрівачів ($N, \text{Вт}$) для підігріву субстрату протягом часу за формулою:

$$N = \frac{Q_{\text{нагр}}}{3600 \cdot \tau_{\text{нагр}} \cdot \eta}, \quad (2.51)$$

де: $Q_{\text{нагр}}$ – кількість витраченої теплоти на підтримку постійної

температури зброджування у біогазовому реакторі, $Дж$; $\tau_{нагр}$ – час роботи нагрівачів, год; η – коефіцієнт корисної дії нагрівача.

Отримуємо математичну модель визначення енергетичних витрат, необхідних для підігріву субстрату у біогазовому реакторі у наступному вигляді [16–18]:

$$\left. \begin{aligned} Q_{суб} + Q_{бр} + Q_{нагр} + Q_{ох.н.п} + Q_{зав.суб} &= Q_{навк} + Q_{біогаз} + Q_{шл}; \\ Q_{суб} &= c_{суб} \cdot m_{суб} \cdot (t_{суб} - t_{навк}); \\ Q_{бр} &\approx 0; \\ Q_{біогаз} &= c_{біогаз} \cdot V_{біогаз} \cdot \rho_{біогаз} \cdot (t_{біогаз} - t_{навк}) \cdot T_b; \\ Q_{шл} &= c_{шл} \cdot m_{шл} \cdot (t_{шл} - t_{навк}); \\ Q_{зав.суб} &= c_{зав.суб} \cdot m_{зав.суб} \cdot (t_{зав.суб} - t_{навк}); \\ Q_{навк} &= k \cdot F \cdot \tau \cdot (t_{суб} - t_{навк}); \\ Q_{нагр} &= Q_{навк} + Q_{біогаз} + Q_{шл} - Q_{ох.н.п} - Q_{зав.суб}; \\ Q_{ох.н.п} &= c_{н.п} \cdot m_{н.п} \cdot (t_{н.п} - t_{суб}); \\ N &= \frac{Q_{нагр}}{3600 \cdot \tau_{нагр} \cdot \eta}. \end{aligned} \right\} \quad (2.52)$$

Отримана математична модель (2.52) дозволяє визначати необхідну кількість теплової ($Q_{нагр}$, $Дж$) та електричної (N , $Вт$) енергій для підігріву та підтримки постійної температури субстрату у біогазовому реакторі під час зброджування, а також визначити процеси з найбільшими тепловими втратами, що дає можливість підвищити енергоефективність біогазових установок [16–18]. Математичну модель доповнено величиною теплової енергії вивільненої під час охолодження нагрівального пристрою.

2.3.1. Дослідження зміни величини втрат тепла у навколишнє середовище

Біогазовий реактор є багатовимірною системою зі змінними технологічними параметрами у часі, які потребують певної електричної, теплової та механічної енергії. Як у будь-якому технологічному процесі, у першу чергу переслідуються

мета створення налагодженої системи з найменшими капітальними витратами для зведення витрат енергоносіїв до мінімуму. Біогазові комплекси не виключення, тому основною вимогою під час проектування біогазових установок є мінімізація витрат енергії на підтримку температури бродіння:

$$Q_{нагр} \rightarrow 0, \quad (2.53)$$

Однак, під час анаеробного бродіння біогазовий реактор розташований у кліматичній зоні навколишнього середовища, згідно з законом теплової рівноваги, при контакті двох середовищ з різною температурою між ними відбувається перенесення тепла, у результаті якого їх температура вирівнюється. Швидкість теплової віддачі від біогазового реактора до навколишнього середовища залежить від властивостей теплоізоляційних матеріалів та багатьох умов, характеризуючих стан навколишнього середовища, та геометричних і технологічних параметрів біогазового реактора. Величина теплових втрат субстрату, що знаходиться у біогазовому реакторі, у навколишнє середовище залежить від багатьох умов, наведених у залежності (2.38).

З метою визначення потужності, необхідної на покриття теплових втрат у навколишнє середовище для мезофільного температурного режиму анаеробного зброджування при різних температурах навколишнього середовища та наявності і відсутності утеплювального матеріалу на стінках біогазового реактора, використано залежності (2.39 – 2.48 та 2.51) згідно з заданими початковими умовами: $t_{брод} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{навк} = -30 \dots +30 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $v_{гim} = 2 \text{ м/с}$. Розглядаються біогазові реактори циліндричної форми з наступними геометричними параметрами: об'єм $V_{реак} = 50 \dots 200 \text{ л}$; висота $H = 0,6 \dots 0,88 \text{ м}$; радіус $R = 0,18 \dots 0,28 \text{ м}$. Матеріал біогазового реактора – сталь, з наступними параметрами: коефіцієнт теплопровідності стінки $\lambda_{ст} = 50 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, товщина стінки $\delta_{ст} = 0,005 \text{ м}$. Фізико-хімічні параметри субстрату, завантаженого у реактор: $\lambda = 0,62 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, $c = 4200 \text{ Дж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$, $\mu = 0,048 \text{ Па}\cdot\text{с}$. У якості утеплювального матеріалу, приймаємо мінеральну вату з наступними параметрами: коефіцієнт теплопровідності ізолюючого матеріалу $\lambda_{із.мат} = 0,037 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, товщина ізолюючого матеріалу

$\delta_{iz.mat} = 0,1 \text{ м}$. У результаті анаеробного зброджування субстрату на стінках реактора відбувається налипання твердих часточок [3, 81], що створює додаткову перешкоду для теплообміну між наявним у реакторі субстратом та навколишнім середовищем. Для проведення теоретичного аналізу приймаємо наступні припущення: завантаження та вивантаження субстрату у біогазовий реактор – відсутнє; величина забруднюючого опору є незмінною і становить $r_{заб} = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ (м}^2 \cdot \text{°C) / Вт}$ [3, 79]; на момент дослідження теплових втрат у навколишнє середовище підігрів субстрату відсутній, швидкість перемішуючого пристрою залишається незмінною у часі і становить 40 об/хв .

Результати проведеного теоретичного аналізу представлено у вигляді графічних залежностей [3] на яких зображено необхідна витрата потужності для покриття теплових втрат у навколишнє середовище при мезофільному температурному режимі зброджування за різних температур навколишнього середовища та різних об'ємів біогазових реакторів з постійним забрудненням внутрішніх стінок, при утепленому реакторі шаром мінеральної вати завтовшки 100 мм (рис. 2.7) та не утепленому реакторі (рис. 2.8).

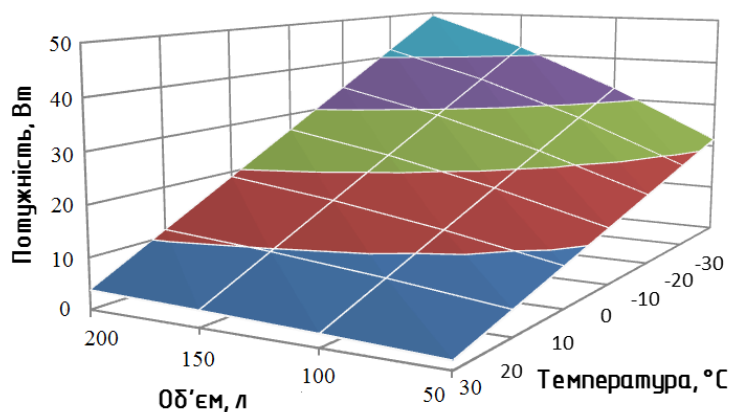


Рис. 2.7. Необхідна витрата потужності для покриття теплових втрат у навколишнє середовище при мезофільному температурному режимі зброджування за різних температур навколишнього середовища та різних об'ємів біогазових реакторів з постійним забрудненням внутрішніх стінок, при утепленому реакторі шаром мінеральної вати завтовшки 100 мм [3].

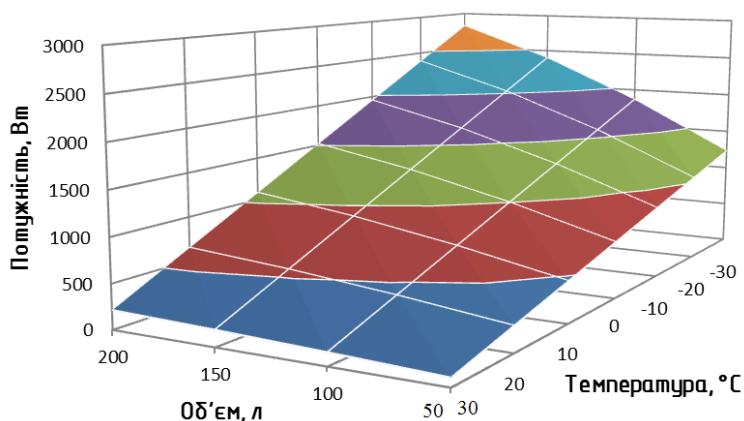


Рис. 2.8. Необхідна витрата потужності для покриття теплових втрат у навколишнє середовище при мезофільному температурному режимі зброджування за різних температур навколишнього середовища та різних об'ємів біогазових реакторів з постійним забрудненням внутрішніх стінок, при відсутності утепленого шару [3].

Із графічних залежностей витрати потужності для покриття теплових втрат у навколишнє середовище (рис. 2.7 та рис. 2.8) виявлено, що зі збільшенням температури навколишнього середовища ($t_{навк} \rightarrow max, ^\circ C$), втрати – зменшуються. Це пояснюється законом термодинамічної рівноваги.

Для розглянутих об'ємів біогазових реакторів, при температурі навколишнього середовища ($t_{навк} = -30\ ^\circ C$), для утепленого реактора (рис. 2.7) витрата потужності складає від 22 до 49 Вт, а для не утепленого реактора (рис. 2.8) від 1232 до 2822 Вт. При температурі навколишнього середовища ($t_{навк} = +10\ ^\circ C$), для утепленого реактора (рис. 2.7) витрата потужності складає від 8 до 19 Вт, а для не утепленого реактора (рис. 2.8) від 474 до 1085 Вт [3].

Аналізуючи графічні залежності (рис. 2.7 та рис. 2.8) встановлено, що для одного об'єму біомаси за різної температури навколишнього середовища втрати теплоти мають лінійну залежність, тоді як, для різних об'ємів біогазових реакторів не залежно від температури навколишнього середовища та наявності або відсутності утеплювального шару втрата тепла у навколишнє середовище має не лінійний характер [3].

Утеплення біогазових реакторів забезпечує суттєве зниження витрати електричної енергії на поновлення втрат тепла у навколишнє середовище у 55 – 63 рази, що у свою чергу, створює умови для підвищення рентабельності біогазової установки [3].

У ході проведених теоретичних досліджень встановлено, що за наявності забруднення на стінках біогазового реактора, створюється додаткова перешкода для проходження теплоти, як з біогазового реактора у навколишнє середовище, так і навпаки. Через що, доцільно використовувати електротехнічні пристрої для підігріву субстрату у безпосередньому середовищі біогазового реактора.

2.3.2. Дослідження зміни теплового потоку від частоти перемішування та наявності осаду на нагрівачі

У процесі анаеробного зброджування субстрату налипання твердих часточок відбувається не лише на стінки біогазового реактора, а й на всі предмети котрі знаходяться у об'ємі субстрату, у тому числі і на нагрівальні пристрої [6, 81], ці забруднення негативно впливають на інтенсифікацію та рівномірність процесу тепловіддачі.

За відсутності перемішування, налипання часточок відбувається швидше, що викликає підвищене енергоспоживання та зменшення продуктивності біогазової установки [81]. Тому, з метою підвищення енергетичної ефективності рівномірної підтримки температури анаеробного бродіння органічного субстрату, необхідно розглядати систему нагріву у поєднанні з перемішуючим пристроєм, при цьому, на початковому етапі проектування такої системи необхідно враховувати зміну теплового потоку від наявності налипання бруду на поверхні комбінованого заглибного пристрою для перемішування та підігріву субстрату у біогазових реакторах.

Електротепломеханічна система перемішування та електричного підігріву наведена на (рис. 2.9).

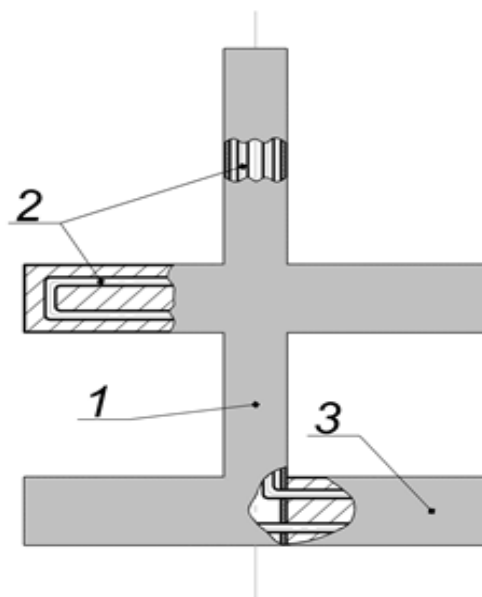


Рис. 2.9. Електротепломеханічна система перемішування та електричного підігріву: 1 – циліндричний порожнистий вал; 2 – електричний нагрівальний елемент; 3 – лопать.

Розглянувши конструкцію заглибної комбінованої електротепломеханічної системи перемішування та електричного підігріву (рис. 2.9) встановлено, що теплопередача від електричного нагрівального елемента вмонтованого у лопаті та вал перемішуючого пристрою, до субстрату відбувається за такою схемою: процес передачі теплоти від нагрівального елемента у товщині стінки перемішуючого пристрою; теплопровідність у товщині шару налипання на лопаті та вал перемішуючого пристрою; заключний етап – тепловіддача від зовнішньої поверхні нагрівача та корпусу перемішуючого пристрою до субстрату.

Тепловий потік для кожного з етапів матиме наступний вигляд:

- процес передачі теплоти від нагрівального елемента у товщині стінки перемішуючого пристрою [6]:

$$q_{нагр1} = k_1 \cdot F_1 \cdot \tau \cdot (t_{нагр} - t_m), \quad (2.54)$$

$$k_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \quad (2.55)$$

- теплопровідність у товщині шару налипання на лопаті та вал перемішуючого пристрою [6]:

$$q_{нагр2} = r_{заб} \cdot F_2 \cdot \tau \cdot (t_m - t_{брод}), \quad (2.56)$$

- тепловіддача від зовнішньої поверхні нагрівача до субстрату:

$$q_{нагр3} = k \cdot F \cdot \tau \cdot (t_m - t_{брод}), \quad (2.57)$$

де: k_1 – коефіцієнт теплопередачі у товщині стінки перемішуючого пристрою, $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$; λ_1 – коефіцієнт теплопровідності матеріалу лопаті та валу перемішуючого пристрою, $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$; τ – час; δ_1 – товщина стінки лопаті та валу, m ; F – площа нагрівальної поверхні, m^2 ; F_1 – площа поверхні електричного нагрівача, m^2 ; F_2 – площа забруднюючого шару, m^2 ; $t_{нагр}$ – температура електричного нагрівача вмонтованого у вал та лопаті перемішуючого пристрою, $^\circ C$; t_m – температура на зовнішній стінці лопатей та валу комбінованої системи перемішування та підігріву, $^\circ C$; $t_{брод}$ – температура зброджування субстрату, $^\circ C$; k – коефіцієнт теплопередачі, враховує середню швидкість теплопередачі по всій поверхні теплообміну, $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$; $r_{заб}$ – опір теплопередачі створений шаром забруднення, $(m^2 \cdot ^\circ C)/Bm$.

У залежності (2.57) коефіцієнт теплопередачі (k) залежить від великої кількості факторів, тому, в залежності від наявності або відсутності забруднюючого шару на поверхні комбінованої системи перемішування та підігріву, його рекомендовано знаходити за наступними рівняннями [6]:

- без забруднюючого шару:

$$k = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_1}}; \quad (2.58)$$

- з наявністю забруднюючого шару:

$$k = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + r_{заб} + \frac{1}{\alpha_1}}, \quad (2.59)$$

Для визначення коефіцієнту тепловіддачі від субстрату до стінки реактора (α_1) використовуємо залежності (2.12, 2.42-2.44).

З метою теоретичного аналізу використано залежності (2.12, 2.42-2.44, 2.54–

2.59) зміни теплового потоку від частоти перемішування та наявності осаду на заглибному нагрівачі задано наступні початкові умови: $t_{под} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, допустиме відхилення температури $t_{дон} = \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ за годину. Конструкція комбінованої системи перемішування та електричного підігріву згідно (рис. 2.9), лопаті та вал якої виконано із нержавіючої сталі, з наступними параметрами: коефіцієнт теплопровідності $\lambda_1 = 15\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, товщина стінки лопаті $\delta_1 = 0,005\text{ м}$, площа лопатей $F_2 = 0,02\text{ м}^2$. Частота обертів перемішуючого пристрою $n = 20 \dots 120\text{ об/хв}$, діаметр перемішуючого пристрою $d_m = 0,31\text{ м}$.

Біогазовий реактор циліндричної форми з наступними геометричними параметрами [6]: об'єм реактора $V_{реак} = 50\text{ л}$, висота реактора $H = 0,6\text{ м}$, радіус реактора $R = 0,18\text{ м}$, внутрішній діаметр реактора $d_{вн} = 0,35\text{ м}$.

Фізико-хімічні параметри органічного субстрату завантаженої у біогазовий реактор вологість субстрату рівна 90%, $\lambda = 0,62\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, $\rho = 1024\text{ кг/м}^3$, $c = 4200\text{ Дж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$, $\mu = 0,048\text{ Па}\cdot\text{с}$.

Для проведення теоретичного аналізу приймаємо наступні припущення: теплові втрати у навколишнє середовище відсутні; температура підігрівального пристрою постійна ($t_{нагр} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$), оскільки, вищі температури призводять до швидкого налипання субстрату та гибелі метаноутворюючих бактерій [78]; температура електричного нагрівача рівна температурі лопатей та валу перемішуючого пристрою ($t_{нагр} = t_m = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$); величина забруднюючого опору змінюється у діапазоні ($r_{зab} = 0 \dots 6,6 \cdot 10^{-4}\text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$); приймаємо рівномірний розподіл забруднюючого шару по поверхні лопатей та валу у які вмонтовано електричні нагрівачі [6].

Результати проведеного теоретичного аналізу представлено у вигляді графічних залежностей [6] на яких зображено: залежність коефіцієнту тепловіддачі (α_1), нагрітої поверхні до об'єму субстрату ($V_{реак} = 50\text{ л}$), від частоти перемішування (n), (рис. 2.10); залежність теплового потоку від частоти

перемішування та величини забруднень на поверхні комбінованої системи перемішування та електричного підігріву (рис. 2.11).

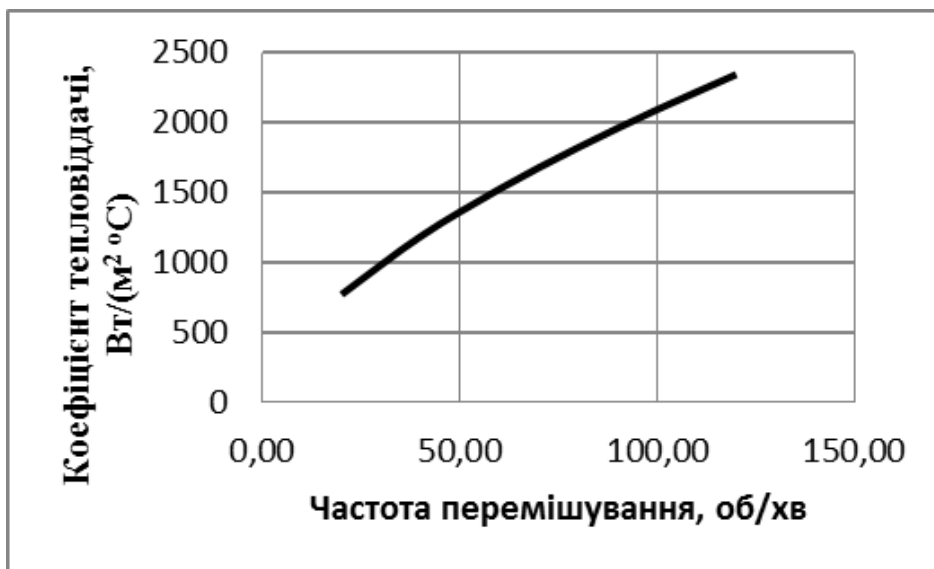


Рис.2.10. Залежність коефіцієнту тепловіддачі α_1 , нагрітої поверхні до об'єму субстрату $V_{\text{реак}} = 50$ л, від частоти перемішування n .

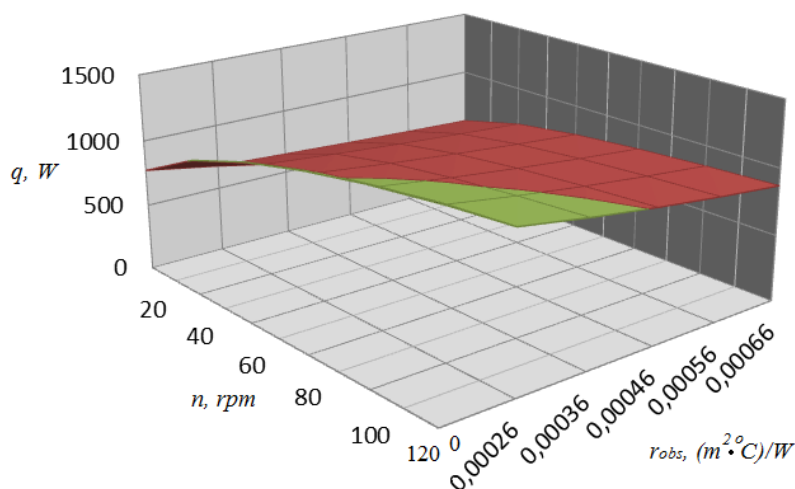


Рис. 2.11. Залежність теплового потоку від частоти перемішування та наявності забруднень на поверхні комбінованої системи перемішування та електричного підігріву [6].

Із рис. 2.10 видно, що зі збільшенням швидкості коефіцієнт тепловіддачі збільшує своє значення, при цьому зростання коефіцієнту тепловіддачі має не лінійний характер [6].

Із графічної залежності (рис. 2.11) видно, що збільшення частоти обертання призводить до пришвидшення теплопередачі від нагрітої поверхні до субстрату, а збільшення забруднюючого шару має суттєвий вплив на розповсюдження теплового потоку, що призводить до зниження інтенсивності тепло розподілу та продуктивності біогазової установки.

Отже, підвищення забруднюючого шару та пришвидшення частоти перемішування призводить до збільшення енергетичних витрат на підтримку рівномірного розподілу температурних полів у біогазовому реакторі [6].

З метою визначення раціональної частоти перемішування субстрату у ході анаеробного зброджування з забрудненим нагрівальним пристроєм, проведено теоретичний аналіз, умовами якого обрано: опір забруднюючого шару є незмінним і становить $(r_{заб} = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C) / Вт})$.

Під раціональною частотою перемішування, розуміється найменше значення розбіжності, між тепловим потоком забрудненого та не забрудненого підігрівача [6].

Отримано графік теплового потоку від нагрівального пристрою до субстрату в залежності від частоти перемішування та наявності забруднень (рис. 2.12).

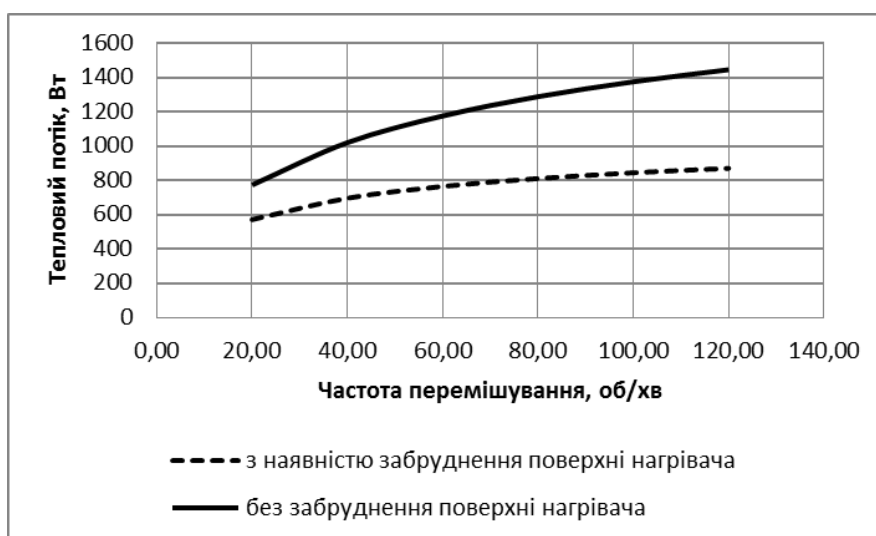


Рис. 2.12. Залежність теплового потоку від частоти перемішування та наявності забруднень на поверхні нагрівального пристрою.

В результаті аналізу отриманої залежності теплового потоку (рис. 2.12) можна зробити висновок, що збільшення частоти обертання робочого органу, у який вмонтовано нагрівальний пристрій, призводить до пришвидшення теплопередачі від поверхні нагрівального пристрою до об'єму субстрату, а збільшення забруднюючого шару на поверхні нагрівача, має суттєвий вплив на коефіцієнт теплопередачі, а відповідно і розповсюдження теплового потоку, що у свою чергу, призводить до погіршення інтенсивності тепло розподілу по об'єму субстрату, збільшення споживання енергії на процеси інтенсифікації біогазового виробництва та зниження продуктивності біогазової установки [6].

Таблиця 2.1.

Порівняльна таблиця зміни величини теплового потоку

Поверхня нагрівача	Частота обертання змішуючого пристрою з нагрівальними елементами, об/хв					
	20	40	60	80	100	120
	Величина теплового потоку, Вт					
Забруднена	571	696	765	811	844	870
Без забруднення	773	1020	1176	1288	1375	1446
Розбіжність, %	26,1	31,8	34,9	37	38,6	39,8

У результаті проведеного теоретичного дослідження, встановлено, що зростання теплового потоку має не лінійний характер, як для нагрівача із забрудненням поверхні, так і без забруднення [6].

Проведений теоретичний аналіз дослідження зміни теплового потоку від частоти перемішування та наявності осаду на поверхні нагрівача (Таблиця 2.1) свідчить про те, що раціональна частота перемішування електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі з врахуванням величини забруднюючого шару на поверхні електротепломеханічної системи, знаходиться у діапазоні ($n = 20...40$ об/хв), тоді величина теплового потоку від нагрівального пристрою знаходиться у діапазоні $q_{нагр3} = 571...1020$ Вт [6].

2.4. Динамічний аналіз енергетичних витрат під час підігріву субстрату у біогазовому реакторі

2.4.1. Динамічний аналіз енергетичних витрат під час підігріву субстрату електричним підігрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора

Продуктивність біогазової установки знаходиться у функціональній залежності від температурного режиму анаеробного бродіння. Температура має вплив на кількість та якість утвореного біогазу з одного кілограму сухої органічної речовини протягом проміжку часу та бродіння у реакторі. З метою підтримки постійної температури зброджування субстрату використовуються електричні нагрівальні елементи змонтовані на зовнішній стінці біогазового реактора (рис. 2.13) [9].

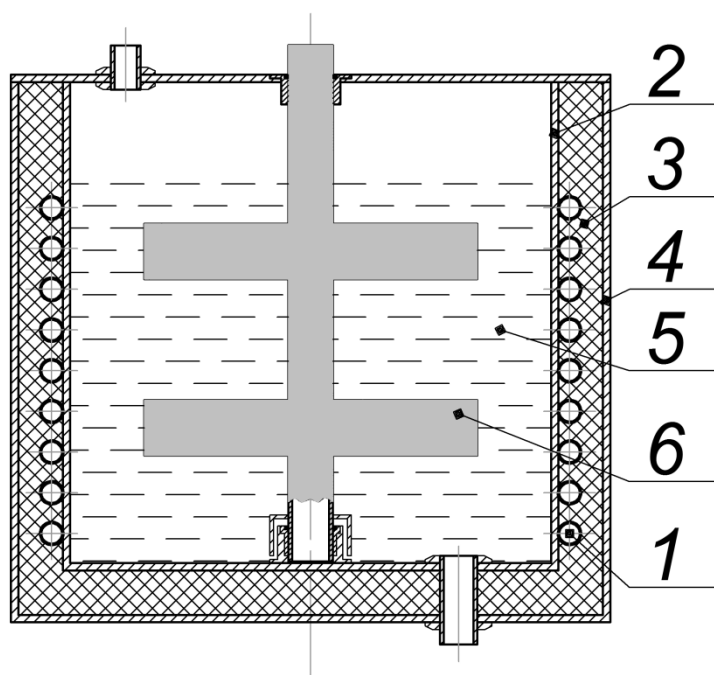


Рис. 2.13 Структурна схема системи електричного підігріву змонтованого на зовнішній стінці біогазового реактора [9]: 1 – електричний нагрівальний кабель; 2 – зовнішня стінка біогазового реактора; 3 – утеплювальний матеріал; 4 – захисний металевий кожух; 5 – субстрат; 6 – механічний змішувач.

Структурна схема системи електричного підігріву змонтованого на зовнішній стінці біогазового реактора має наступний вигляд (рис. 2.13): електричний нагрівальний кабель (1) прокладений по зовнішній стінці біогазового реактора (2), поверх кабелю змонтовано утеплювальний матеріал (3) та закрито захисним металевим кожухом (4) для уникнення механічних пошкоджень та впливу вологи на утеплювальний матеріал.

Підчас своєї роботи, до електричного нагрівального кабелю (1) прикладається напруга живлення, що призводить до його нагріву. Оскільки кабель щільно змонтований до зовнішньої стінки біогазового реактора, у якому знаходиться об'єм субстрату (5), частина теплової енергії віддається на нагрів стінки, субстрату та втрати в навколишнє середовище.

Розглянемо процес теплової передачі від нагрівального кабелю розміщеного на зовнішній стінці біогазового реактора до субстрату. Тепловий баланс електричного нагрівального кабелю описується наступним рівнянням:

$$Q_{ел} = Q_{сн} + Q_{із} + Q_c + Q_{суб} + Q_{вт}, \quad (2.60)$$

де: $Q_{сн}$, $Q_{із}$ – кількість теплоти необхідної на нагрів спіралі та ізоляції електричного нагрівального кабелю, відповідно, Дж; $Q_{суб}$ – кількість теплоти необхідної на нагрів субстрату, Дж; Q_c – кількість теплоти відданої на нагрів стінки біогазового реактора, Дж; $Q_{вт}$ – кількість теплоти втраченої в навколишнє середовище, Дж.

Згідно закону Джоуля-Ленца, кількість теплоти виділеної електричним нагрівальним кабелем описується залежністю:

$$Q_{ел} = P \cdot \tau = \frac{U^2}{R} \cdot \tau = I^2 \cdot R \cdot \tau = U \cdot I \cdot \tau, \quad (2.61)$$

де: U – напруга живлення електричного нагрівального кабелю, В; P – потужність прикладена до електричного нагрівального кабелю, Вт; I – струм, що протікає по електричному нагрівальному кабелю, А; R – опір електричного нагрівального кабелю, Ом; τ – час, с.

Кількість теплоти необхідної на нагрів спіралі електричного нагрівального

кабелю визначається з залежності:

$$Q_{cn} = c_{cn} \cdot m_{cn} \cdot (T_{cn1} - T_{cn2}), \quad (2.62)$$

де: m_{cn} – маса спіралі електричного нагрівального кабелю, кг; c_{cn} – питома теплоємність спіралі електричного нагрівального кабелю, Дж/(кг·°C); T_{cn1} – кінцева температура спіралі електричного нагрівального кабелю, °C; T_{cn2} – початкова температура спіралі електричного нагрівального кабелю, °C.

Кількість теплоти необхідної на нагрів ізоляції електричного нагрівального кабелю визначається з залежності:

$$Q_{i31} = c_{i3} \cdot m_{i3} \cdot (T_{i31} - T_{i32}), \quad (2.63)$$

де: m_{i3} – маса ізоляції електричного нагрівального кабелю, кг; c_{i3} – питома теплоємність ізоляції електричного нагрівального кабелю, Дж/(кг·°C); T_{i31} – кінцева температура ізоляції електричного нагрівального кабелю, °C; T_{i32} – початкова температура ізоляції електричного нагрівального кабелю, °C.

Кількість теплоти переданої на нагрів ізоляції електричного нагрівального кабелю визначається з залежності:

$$Q_{i3} = k_{i3} \cdot F_{cn} \cdot (T_{cn} - T_{i3}), \quad (2.64)$$

де: k_{i3} – коефіцієнт теплопередачі через товщину ізоляції електричного нагрівального кабелю, Вт/(м²·°C); F_{cn} – площа спіралі електричного нагрівального кабелю, м²; T_{cn} – температура спіралі електричного нагрівального кабелю, °C; T_{i3} – температура ізоляції електричного нагрівального кабелю, °C.

Кількість теплоти переданої на нагрів стінки біогазового реактора визначається з залежності:

$$Q_c = k_c \cdot F_k \cdot \tau \cdot (T_{i3} - T_c), \quad (2.65)$$

де: k_c – коефіцієнт теплопередачі у товщині стінки біогазового реактора, Вт/(м²·°C); F_k – площа кабелю притисненого до стінки реактора, м²; T_c – температура стінки реактора, °C.

Коефіцієнт теплопередачі (k_{i3}) через товщину ізоляції електричного нагрівального кабелю знаходимо з залежності:

$$k_{i3} = \frac{\lambda_{i3}}{\delta_{i3}}, \quad (2.66)$$

де: λ_{i3} – коефіцієнт теплопровідності ізоляції електричного нагрівального кабелю, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$; δ_{i3} – товщина ізоляції електричного нагрівального кабелю, $м$.

Коефіцієнт теплопередачі (k_c) через стінку біогазового реактора знаходимо з залежності:

$$k_c = \frac{\lambda_{cm}}{\delta_{cm}}, \quad (2.67)$$

де: λ_{cm} – коефіцієнт теплопровідності стінки біогазового реактора, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$; δ_{cm} – товщина стінки біогазового реактора, $м$.

Площу спіралі електричного нагрівального кабелю (F_{cn}) визначаємо з рівняння:

$$F_{cn} = \pi \cdot \frac{d_{cn}}{2} \cdot 2 \cdot l, \quad (2.68)$$

де: d_{cn} – діаметр спіралі електричного нагрівального кабелю, $м$; l – довжина електричного нагрівального кабелю, $м$.

Оскільки, електричний нагрівальний кабель притиснений до стінки реактора третиною своєї поверхні, тому площу (F_k) визначаємо з рівняння:

$$F_k = \frac{\pi \cdot \frac{d_k}{2} \cdot 2 \cdot l}{3}, \quad (2.69)$$

де: d_k – діаметр електричного нагрівального кабелю, $м$.

Відповідно до цього, $2/3$ площі електричного нагрівального кабелю віддають свою енергію через ізолюючий матеріал та захисний кожух у навколишнє середовище:

$$F_{k.6m} = \left(\frac{\pi \cdot \frac{d_k}{2} \cdot 2 \cdot l}{3} \right) \cdot 2, \quad (2.70)$$

де: $F_{k.6m}$ – площа електричного нагрівального кабелю, котра віддає енергію

через ізолюючий матеріал та захисний кожух у навколишнє середовище, m^2 .

Величина теплових втрат залежить від багатьох умов (2.38), тому залежність зв'язку між тепловими втратами у навколишнє середовище та поверхнею електричного нагрівального кабелю змонтованого на стінці біогазового реактора має наступний вигляд [9]:

$$Q_{\text{вт}} = k_{\text{вт}} \cdot F_{\text{к.вт}} \cdot \tau \cdot (T_{\text{із}} - T_{\text{навк}}), \quad (2.71)$$

де: $T_{\text{навк}}$ – температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$; $k_{\text{вт}}$ – коефіцієнт теплопередачі у навколишнє середовище, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Коефіцієнт теплопередачі у навколишнє середовище для пласкої стінки ($k_{\text{вт}}$) визначається з залежності (2.40). Коефіцієнт тепловіддачі від стінки реактора в навколишнє середовище (α_2) визначаємо з залежності (2.45).

Провівши диференціювання по часу вище наведених залежностей, отримали:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{\text{ел}}}{d\tau} &= \frac{dQ_{\text{сн}}}{d\tau} + \frac{dQ_{\text{із}}}{d\tau} + \frac{dQ_{\text{с}}}{d\tau} + \frac{dQ_{\text{вт}}}{d\tau}; \quad \frac{dQ_{\text{ел}}}{d\tau} = P; \quad \frac{dQ_{\text{сн}}}{d\tau} = c_{\text{сн}} \cdot m_{\text{сн}} \cdot \frac{dT_{\text{сн}}}{d\tau}; \\ \frac{dQ_{\text{із1}}}{d\tau} &= c_{\text{із}} \cdot m_{\text{із}} \cdot \frac{dT_{\text{із}}}{d\tau}; \quad \frac{dQ_{\text{із}}}{d\tau} = k_{\text{із}} \cdot F_{\text{к}} \cdot (T_{\text{сн}} - T_{\text{із}}); \\ \frac{dQ_{\text{с}}}{d\tau} &= k_{\text{с}} \cdot F_{\text{к}} \cdot (T_{\text{із}} - T_{\text{с}}); \quad \frac{dQ_{\text{вт}}}{d\tau} = k_{\text{вт}} \cdot F_{\text{к.вт}} \cdot (T_{\text{із}} - T_{\text{навк}}), \end{aligned} \quad (2.72)$$

Тоді, диференційне рівняння зміни температури спіралі нагрівального електричного кабелю матиме вигляд:

$$\frac{dT_{\text{сн}}}{d\tau} = \frac{P + k_{\text{із}} \cdot F_{\text{сн}} \cdot (T_{\text{із}} - T_{\text{сн}})}{c_{\text{сн}} \cdot m_{\text{сн}}}, \quad (2.73)$$

Диференційне рівняння зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю матиме вигляд:

$$\frac{dT_{\text{із}}}{d\tau} = \frac{k_{\text{із}} \cdot F_{\text{сн}} \cdot (T_{\text{сн}} - T_{\text{із}}) + k_{\text{с}} \cdot F_{\text{к}} \cdot (T_{\text{с}} - T_{\text{із}}) + k_{\text{вт}} \cdot F_{\text{к.вт}} \cdot (T_{\text{навк}} - T_{\text{із}})}{c_{\text{із}} \cdot m_{\text{із}}}, \quad (2.74)$$

Номінальна температура електричного нагрівального кабелю не повинна перевищувати 60°C , оскільки вища температура призводить до гибелі бактерій та збільшення налипання часточок субстрату на нагріту поверхню [78].

З метою встановлення двопозиційного регулювання температури електричного нагрівального кабелю у залежність (2.73) введено коефіцієнт регулювання (ξ), тоді диференціальне рівняння зміни температури спіралі нагрівального електричного кабелю набуде наступного вигляду:

$$\frac{dT_{cn}}{d\tau} = \frac{P \cdot \xi + k_{iz} \cdot F_{cn} \cdot (T_{iz} - T_{cn})}{c_{cn} \cdot m_{cn}}, \quad (2.75)$$

Коефіцієнт регулювання (ξ), визначається з залежності [9]:

$$f(\xi) = \begin{cases} \xi = 0, & \text{якщо } T_{iz} \geq T_{к.ном} \\ \xi = 1, & \text{якщо } T_{iz} < T_{к.ном} \end{cases}, \quad (2.76)$$

де: $T_{к.ном}$ – номінальна температура поверхні нагрівального кабелю, $^{\circ}\text{C}$.

За умови ($T_{iz} \geq T_{к.ном}$), коефіцієнт регулювання ($\xi = 0$), відповідно до цього, добуток ($P \cdot \xi = 0$), потужність прикладена до спіралі електричного нагрівального кабелю вимкнена. За умови, що ($T_{iz} < T_{к.ном}$), коефіцієнт регулювання ($\xi = 1$), відповідно до цього, добуток ($P \cdot \xi = P$), потужність прикладена до спіралі електричного нагрівального кабелю ввімкнена [9].

Тепловий баланс системи «реактор-субстрат» описується наступним рівнянням:

$$Q_{p-c} = Q_p + Q_{cуб} + Q_{вт}, \quad (2.77)$$

де: Q_{p-c} – кількість теплоти необхідної для нагріву системи «реактор-субстрат», Дж; Q_p – кількість теплоти необхідної на нагрів стінки реактора, Дж; $Q_{cуб}$ – кількість теплоти необхідної на нагрів субстрату, Дж.

Кількість теплоти необхідної на нагрів стінки реактора:

$$Q_p = c_p \cdot m_p \cdot (T_{p1} - T_{p2}), \quad (2.78)$$

де: m_p – маса реактора, кг; c_p – питома теплоємність матеріалу з якого виготовлено реактор, Дж/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$); T_{p1} , T_{p2} – кінцева та початкова температури стінки реактора, $^{\circ}\text{C}$.

Кількість теплоти необхідної на нагрів субстрату визначається з залежності (2.33).

Маса субстрату визначається з залежності:

$$m_{cy6} = V \cdot \rho_{cy6}, \quad (2.79)$$

де: ρ_{cy6} – густина субстрату, kg/m^3 ; V – об'єм субстрату, m^3 .

Кількість теплоти переданої на нагрів субстрату від стінки біогазового реактора визначається з залежності:

$$Q_{cy61} = \alpha_1 \cdot F_c \cdot \tau \cdot (T_c - T_{cy6}), \quad (2.80)$$

де: α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки біогазового реактора до об'єму субстрату, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; F_c – внутрішня площа стінки біогазового реактора, m^2 ; T_c – температура стінки реактора, $^\circ C$; T_{cy6} – температура субстрату, $^\circ C$.

Для визначення коефіцієнту тепловіддачі від субстрату до стінки реактора (α_1) використовуємо залежності (2.12, 2.42-2.44) та залежності наведені у (Додатку В.1 – В.3).

Внутрішня (F_c) та зовнішня (F_{c1}) площі стінки біогазового реактора визначається з залежностей:

$$F_c = \pi \cdot \frac{d_6}{2} \cdot 2 \cdot l_2, \quad (2.81)$$

$$F_{c1} = \pi \cdot \frac{d_5}{2} \cdot 2 \cdot l_2, \quad (2.82)$$

де: d_6 – внутрішній діаметр реактора, m ; d_5 – зовнішній діаметр реактора, m ; l_2 – висота субстрату у біогазовому реакторі, m .

Площа основи біогазового реактора визначається з залежності:

$$F_{ocn} = \pi \cdot \left(\frac{d_5}{2} \right)^2. \quad (2.83)$$

Величина теплових втрат залежить від багатьох умов (2.38), тому залежність зв'язку між тепловими втратами у навколишнє середовище та циліндричною стінкою біогазового реактора на якій змонтовано електричний

нагрівальний кабель має наступний вигляд:

$$Q_{\text{вт}} = k_l \cdot (H_1 - H_k) \cdot \tau \cdot (T_c - T_{\text{навк}}), \quad (2.84)$$

де: $T_{\text{навк}}$ – температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$; k_l – лінійний коефіцієнт теплопередачі у навколишнє середовище, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$; H_1 – висота біореактора, м ; H_k – сумарна висота кабелю на зовнішній стінці біореактора, м .

Коефіцієнт теплопередачі у навколишнє середовище для циліндричної стінки за умови розташування нагрівального елемента на зовнішній стінці біогазового реактора визначається з залежності [9]:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{\text{см}}} \ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{\text{із.мат}}} \ln \frac{d_3}{d_4}}, \quad (2.85)$$

де: α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки реактора в навколишнє середовище, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; d_1, d_2 – зовнішній та внутрішній діаметр захисного кожуху реактора, відповідно, м ; d_3, d_4 – зовнішній та внутрішній діаметр ізолюючого матеріалу, відповідно, м .

Сумарна висота кабелю змонтованого на зовнішній стінці біогазового реактора визначається з залежності:

$$H_k = (d_k + z) \cdot w_1, \quad (2.86)$$

де: d_k – діаметр електричного нагрівального кабелю, м ; z – коефіцієнт запасу теплорозподілу по стінці реактора, ($z = 0.004 \text{ м}$); w_1 – кількість витків кабелю на стінці реактора.

$$w_1 = \frac{l}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_5}{2} \right)}, \quad (2.87)$$

де: l – довжина електричного нагрівального кабелю, м .

Кількість теплоти необхідної для нагріву системи «реактор-субстрат» визначається з залежності:

$$Q_{p-c} = Q_{\text{нагр}} \cdot \tau, \quad (2.88)$$

де: $Q_{нагр}$ – тепловий потік від нагрівального кабелю до субстрату, $Вт$.

Значення теплового потоку від електричного нагрівального кабелю змонтованого на зовнішній стінці біогазового реактора використовуючи залежності (2.86, 2.90 – 2.91) визначається наступним чином:

$$Q_{нагр} = \frac{\pi \cdot (T_{із} - T_{суб})}{R_1 + R_2} \cdot H_{\kappa}, \quad (2.89)$$

де: R_1 – термічний опір теплопровідності циліндричної стінки біогазового реактора, $м^0С/Вт$; R_2 – термічний опір тепловіддачі від циліндричної стінки реактора до об'єму субстрату, $м^0С/Вт$; H_{κ} – сумарна висота кабелю змонтованого на зовнішній стінці біогазового реактора, $м$.

Термічний опір теплопровідності стінки біогазового реактора та термічний опір тепловіддачі від стінки реактора до об'єму субстрату для циліндричної стінки визначаються з залежностей:

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{cm}} \ln \frac{d_5}{d_6}, \quad (2.90)$$

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_6}. \quad (2.91)$$

Для визначення коефіцієнту тепловіддачі від субстрату до стінки реактора (α_1) використовуємо залежності (2.12, 2.42-2.44) та залежності наведені у (Додатку В.1–В.3).

Провівши диференціювання по часу, вищенаведених залежностей, отримали:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{p-c}}{d\tau} &= \frac{dQ_p}{d\tau} + \frac{dQ_{суб}}{d\tau} + \frac{dQ_{см}}{d\tau}; \quad \frac{dQ_{p-c}}{d\tau} = Q_{нагр}; \quad \frac{dQ_p}{d\tau} = c_p \cdot m_p \cdot \frac{dT_p}{d\tau}; \\ \frac{dQ_{суб}}{d\tau} &= c_{суб} \cdot m_{суб} \cdot \frac{dT_{суб}}{d\tau}; \quad \frac{dQ_{суб1}}{d\tau} = \alpha_1 \cdot F_c \cdot \frac{dT_{суб}}{d\tau}; \\ \frac{dQ_{см}}{d\tau} &= k_l \cdot (H_1 - H_{\kappa}) \cdot (T_c - T_{навк}) \end{aligned} \quad (2.92)$$

Диференційне рівняння зміни температури стінки реактора із електричним нагрівальним кабелем змонтованим на зовнішній стінці реактора має вигляд:

$$\frac{dT_c}{d\tau} = \frac{k_c \cdot F_k \cdot (T_{i3} - T_c) + \alpha_1 \cdot F_c \cdot (T_{cy6} - T_c) + k_l \cdot (H_1 - H_k) \cdot (T_n - T_c)}{c_p \cdot m_p}, \quad (2.93)$$

Тоді, диференційне рівняння зміни температури субстрату із електричним нагрівальним кабелем змонтованим на стінці біогазового реактора матиме вигляд:

$$\frac{dT_{cy6}}{d\tau} = \frac{Q_{нагр} + \alpha_1 \cdot F_c \cdot (T_c - T_{cy6})}{c_{cy6} \cdot m_{cy6}}, \quad (2.94)$$

Математична модель для визначення енергетичних витрат підчас підігріву субстрату електричним підігрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора набуває наступного вигляду [16-18]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT_{cn}}{d\tau} &= \frac{P \cdot \xi + k_{i3} \cdot F_{cn} \cdot (T_{i3} - T_{cn})}{c_{cn} \cdot m_{cn}}, \\ \frac{dT_{i3}}{d\tau} &= \frac{k_{i3} \cdot F_{cn} \cdot (T_{cn} - T_{i3}) + k_c \cdot F_k \cdot (T_c - T_{i3}) + k_{вт} \cdot F_{к.вт} \cdot (T_{навк} - T_{i3})}{c_{i3} \cdot m_{i3}}, \\ f(\xi) &= \begin{cases} \xi = 0, & \text{якщо } T_{i3} \geq T_{к.ном} \\ \xi = 1, & \text{якщо } T_{i3} < T_{к.ном} \end{cases}; \\ Q_{нагр} &= \frac{\pi \cdot (T_{i3} - T_{cy6})}{R_1 + R_2} \cdot H_k; \\ \frac{dT_c}{d\tau} &= \frac{k_c \cdot F_k \cdot (T_{i3} - T_c) + \alpha_1 \cdot F_c \cdot (T_{cy6} - T_c) + k_l \cdot (H_1 - H_k) \cdot (T_n - T_c)}{c_p \cdot m_p}; \\ \frac{dT_{cy6}}{d\tau} &= \frac{Q_{нагр} + \alpha_1 \cdot F_c \cdot (T_c - T_{cy6})}{c_{cy6} \cdot m_{cy6}}, \end{aligned} \right\} \quad (2.95)$$

Отримана математична модель (2.95) дозволяє у повній мірі дослідити динаміку зміни температури кожного, твердого або рідко подібного об'єкту, що приймає участь у процесі нагріву та визначити кількість енергії необхідної на процес термостабілізації анаеробного бродіння при розміщенні електричного нагрівального кабелю на зовнішній стінці біогазового реактора [16-18].

Використовуючи математичну модель (2.95) проведено динамічний аналіз зміни температури субстрату підчас підігріву електричним підігрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора (рис. 2.13).

Метою динамічного аналізу є дослідження процесу зміни температури субстрату та температури електричного нагрівального кабелю в часі з подальшим підрахунком витраченої кількості енергії необхідної на нагрів субстрату котрий знаходиться у замкненому біогазовому реакторі на $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Динамічний аналіз проводимо за заданими умовами: зброджування субстрату відбувається при мезофільному температурному режимі. $t_{\text{под}} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, допустиме відхилення температури $t_{\text{дон}} = \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ за годину. Біогазовий реактор циліндричної форми з наступними геометричними параметрами: висота $H = 0,6\text{ м}$, внутрішній діаметр $d_6 = 0,368\text{ м}$, зовнішній діаметр $d_5 = 0,37\text{ м}$, матеріал – сталь, коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{\text{ст}} = 50\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$; товщина стінки $\delta_{\text{ст}} = 0,001\text{ м}$, маса реактора разом з нижньою та верхньою кришками $m_p = 60\text{ кг}$, питома теплоємність матеріалу з якого виконано реактор $c_p = 600\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$. Фізико-хімічні параметри органічного субстрату завантаженого у біогазовий реактор: вологість рівна 90%, коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,58\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$, питома густина $\rho_{\text{суб}} = 1000\text{ кг}/\text{м}^3$, питома теплоємність субстрату $c_{\text{суб}} = 4200\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$, маса субстрату $m_{\text{суб}} = 40\text{ кг}$, динамічна в'язкість субстрату $\mu = 0,001004\text{ Па}\cdot\text{с}$, висота субстрату у біогазовому реакторі $l_2 = 0,4\text{ м}$. Згідно з проведеними теоретичними дослідженнями частота обертів комбінованої системи перемішування та підігріву субстрату $n = 40\text{ об}/\text{хв}$ [3–5, 7], конструкція системи перемішування наведена на рис. 2.13.

У якості утеплювального матеріалу приймаємо мінеральну вату з наступними параметрами: коефіцієнт теплопровідності ізолюючого матеріалу $\lambda_{\text{із.мат}} = 0,037\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$, товщина ізолюючого матеріалу $\delta_{\text{із.мат}} = 0,1\text{ м}$, внутрішній діаметр ізолюючого матеріалу $d_4 = 0,37\text{ м}$, зовнішній діаметр ізолюючого матеріалу $d_3 = 0,57\text{ м}$. Шар мінеральної вати захищено металевим кожухом з наступними параметрами: зовнішній діаметр захисного кожуху

реактора $d_1 = 0,58$ м, внутрішній діаметр захисного кожуху $d_2 = 0,576$ м.

Захисний кожух виконано з металу, коефіцієнт теплопровідності захисного кожуху $\lambda_{cm} = 45$ Вт/(м·°С), товщина стінки захисного кожуху $\delta_{cm} = 0,002$ м.

Підігрів виконано електричним нагрівальним кабелем із вуглецевого волокна з ізоляцією із кремнійорганічної гуми марки КН141 з наступними технічними характеристиками: зовнішній діаметр кабелю $d_k = 0,003$ м, електричний опір одного метру кабелю $R_k = 141$ Ом/м, діаметр спіралі $d_{cn} = 0,001$ м, маса одного метру погонного спіралі електричного нагрівального кабелю $m_{cn} = 0,002$ кг, питома теплоємність спіралі електричного нагрівального кабелю $c_{cn} = 1800$ Дж/(кг·°С), маса одного метру погонного ізоляції електричного нагрівального кабелю $m_{iz} = 0,008$ кг, питома теплоємність ізоляції електричного нагрівального кабелю $c_{iz} = 4900$ Дж/(кг·°С). Електричний нагрівальний кабель з'єднаний паралельними відрізками, кількість відрізків – 4 шт, довжина одного відрізка $l_k = 5$ м, загальна довжина електричного нагрівального кабелю змонтованого на зовнішній стінці біогазового реактора (рис. 2.12) $l = 20$ м, сумарна потужність прикладена до електричного нагрівального кабелю змонтованого на зовнішній стінці реактора ($P = 274,4$ Вт). Номінальна температура електричного нагрівального кабелю $T_{к.ном} = 60$ °С. Сумарна маса мішалки разом з лопатями становить $m_m = 11$ кг, мішалку виконано із металу, коефіцієнт теплопровідності якого становить $\lambda_m = 45$ Вт/(м·°С) [9].

Для проведення динамічного аналізу зміни температури субстрату під час підігріву електричним підігрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора, було використано наступні початкові умови: $T_{cn}[0] = 34$ °С, $T_{iz}[0] = 34$ °С, $T_c[0] = 34$ °С, $T_{cyб}[0] = 34$ °С, $v_{вim} = const = 5$ м/с, $P = 274,4$ Вт, $T_{навк} = const = 7$ °С. Кінцева умова розрахунку: $T_{cyб} = 35,8$ °С.

У дослідженнях [3–6] встановлено, що теплопередача під час

перемішування інтенсивніша, через це, прийнято, що під час підігріву відбувається перемішування.

Результати динамічного аналізу представлено у вигляді графічних залежностей на яких зображено: залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю (рис. 2.14); залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю (рис. 2.15); залежність зміни температури стінки реактора (рис. 2.16); залежність зміни температури субстрату на $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, від тривалості підігріву (рис. 2.17) [9].

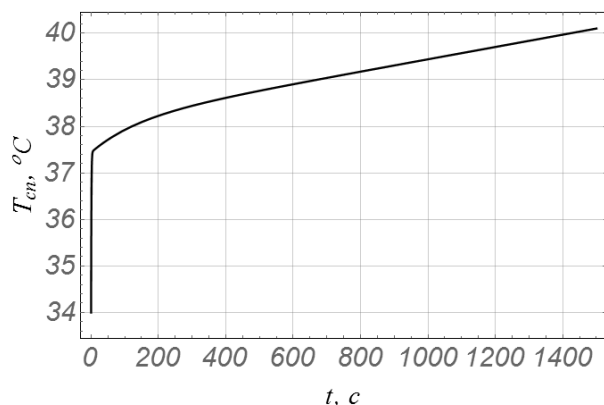


Рис. 2.14. Залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю змонтованого на стінці біогазового реактора від тривалості підігріву

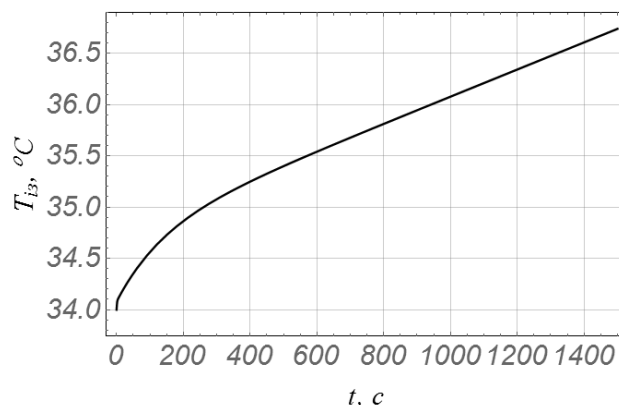


Рис. 2.15. Залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю змонтованого на стінці біогазового реактора від тривалості підігріву

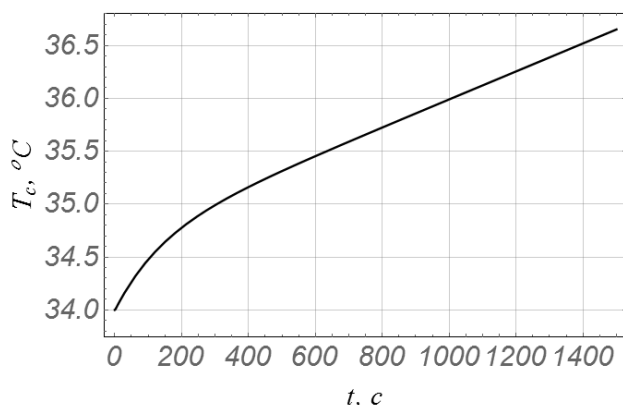


Рис. 2.16. Залежність зміни температури стінки реактора від тривалості підігріву

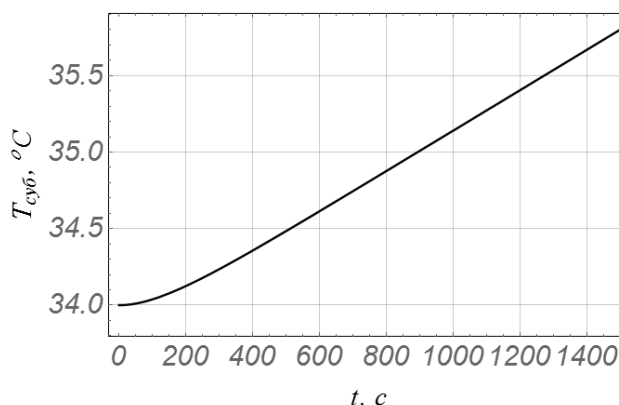


Рис. 2.17. Залежність зміни температури субстрату від тривалості підігріву

Провівши аналіз графічних залежностей зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю (рис. 2.14), температури ізоляції електричного нагрівального кабелю (рис. 2.15), температури стінки реактора (рис. 2.16) та температури субстрату на $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, від тривалості підігріву (рис. 2.17), встановлено, що для нагріву субстрату у біогазовому реакторі на $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ необхідно витратити $(\tau_{ni\partial.1} = 1488\text{ c})$. Знаючи час $(\tau_{ni\partial.1})$, визначено енергію, що витрачається на нагрів субстрату у біогазовому реакторі на $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, за формулою:

$$W_1 = \sum(P \cdot \Delta t), \quad (2.96)$$

де: P – потужність прикладена до електричного нагрівального кабелю змонтованого на зовнішній стінці біогазового реактора, Вт ; Δt – одиниця часу, $\Delta t = 0,001\text{ c}$.

У результаті розрахунків (2.96), визначено, що при використанні системи підігріву, що складається з електричного нагрівального кабелю змонтованого на зовнішній стінці біогазового реактора, для нагріву субстрату у біогазовому реакторі на $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ необхідно витратити $W_1 = 4083072\text{ Дж}$.

Після завершення процесу підігріву субстрату температура об'єктів є різною, про що свідчать графічні залежності (рис. 2.14 – рис. 2.17), згідно закону термодинамічної рівноваги температура об'єктів протягом певного проміжку часу врівноважується [9]. Проведено динамічний аналіз процесу охолодження об'єктів, за наявності перемішування ($n = 40\text{ об/хв}$) та відсутності ($n = 0\text{ об/хв}$), після завершення процесу підігріву субстрату у біогазовому реакторі за допомогою електричного нагрівального кабелю змонтованого на зовнішній стінці біогазового реактора. Метою динамічного аналізу процесу охолодження є дослідження процесу зміни температури та визначення тривалості процесу врівноваження температури об'єктів.

Початкові умови: $T_{cn}[0] = 40,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{iz}[0] = 36,75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_c[0] = 36,65\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{cyб}[0] = 35,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\nu_{\text{вм}} = \text{const} = 5\text{ м/с}$, $P = 0\text{ Вт}$, $T_{\text{наек}} = \text{const} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Кінцева умова розрахунку: $T_{cn} = T_{iz} = T_c = T_{cyб}$.

Результати динамічного аналізу представлено у вигляді графічних залежностей на яких зображено: залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю (рис. 2.18); зміни температури ізоляції нагрівального кабелю (рис. 2.19); зміни температури стінки реактора (рис. 2.20); зміни температури субстрату (рис. 2.21).

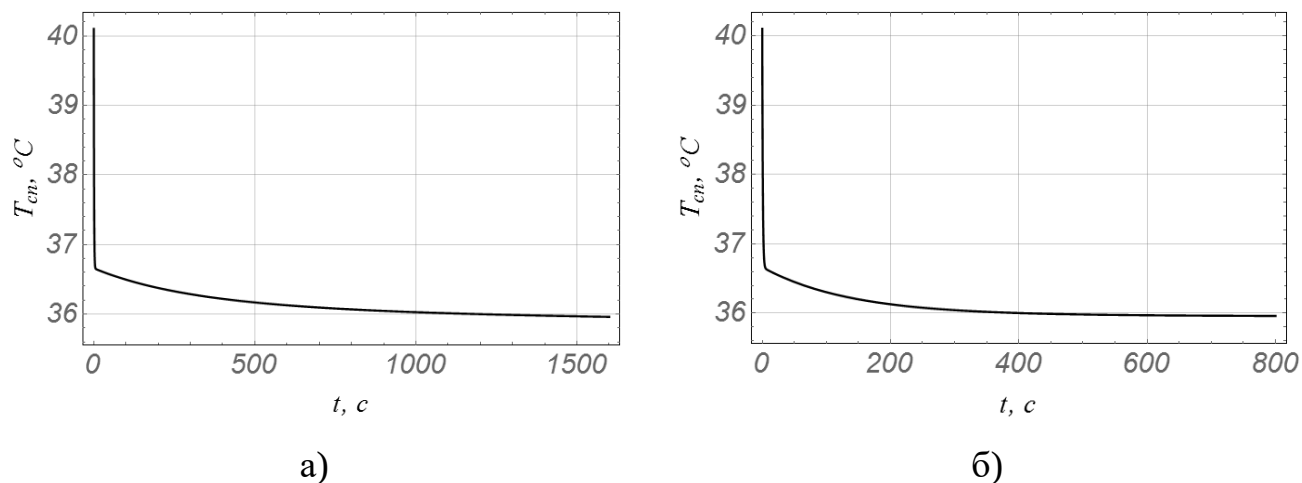


Рис. 2.18. Залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю змонтованого на стінці біогазового реактора від тривалості охолодження:

а) без перемішування, б) з перемішуванням

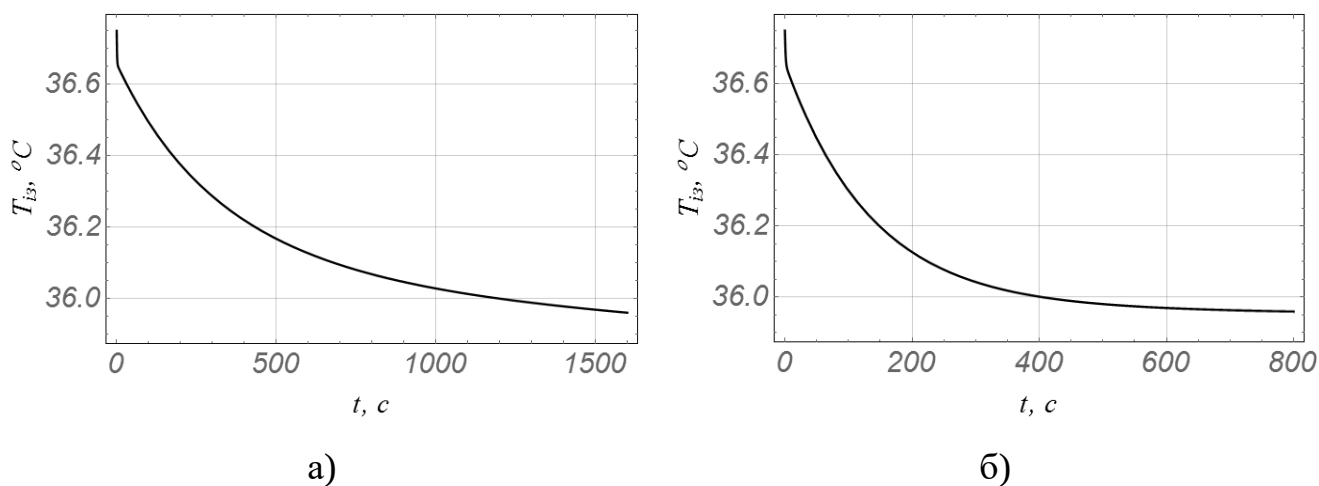


Рис. 2.19. Залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю змонтованого на стінці біогазового реактора від тривалості охолодження:

а) без перемішування, б) з перемішуванням

Розглянувши графічні залежності зміни температури спіралі та ізоляції електричного нагрівального кабелю (рис. 2.18 а, б) та (рис. 2.19 а, б) помітно, що зниження температури спіралі має лавиноподібний характер, тоді як температура ізоляції та температура стінки (рис. 2.20 а, б) зменшується за гіперболічною характеристикою. За відсутності перемішування охолодження об'єктів відбувається повільніше на 57,1%.

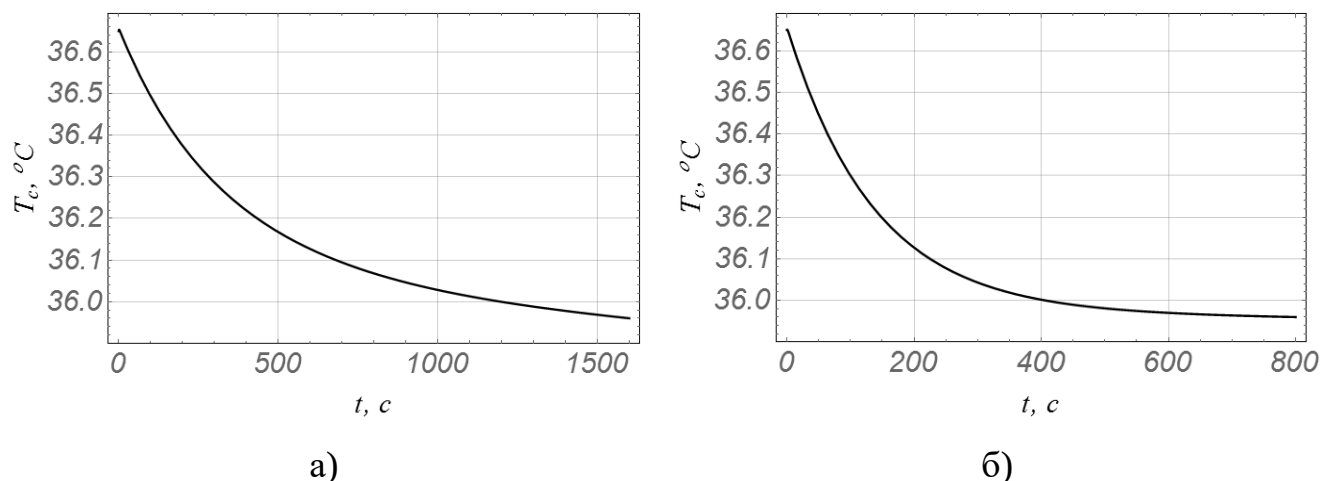


Рис. 2.20. Залежність зміни температури стінки реактора від тривалості охолодження: а) без перемішування, б) з перемішуванням

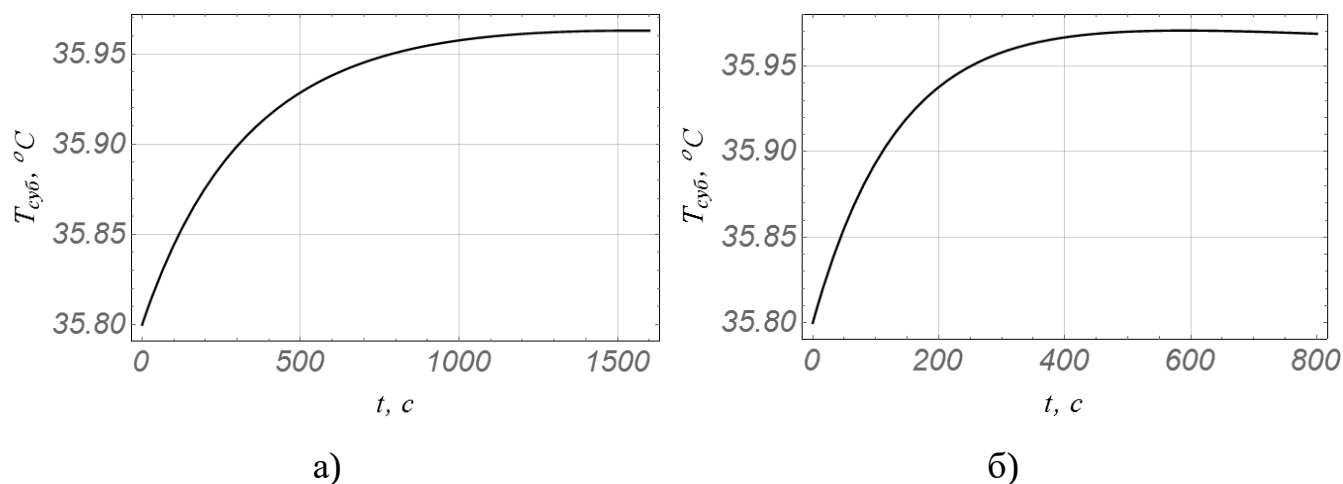


Рис. 2.21. Залежність зміни температури субстрату від тривалості охолодження: а) без перемішування, б) з перемішуванням

Аналізуючи графічну залежність зміни температури субстрату від тривалості охолодження за відсутності перемішування (рис. 2.21 а), помітно, що у

момент часу ($t = 1400$ с) температура об'єктів врівноважилась і стала рівною ($T_{cn} = T_{iz} = T_c = T_{cyb} = 35,97$ °C), тоді як, за наявності перемішування (рис.2.21 б) процес врівноваження температури відбувся у момент часу ($t = 600$ с), а температура стала рівною ($T_{cn} = T_{iz} = T_c = T_{cyb} = 35,97$ °C).

Провівши аналіз отриманих у ході динамічного аналізу графічних залежностей, можна зробити висновок, що під час підігріву субстрату за допомогою електричного нагрівального кабелю розміщеному на зовнішній стінці біогазового реактора, усі об'єкти взаємодіють між собою, але врівноваження їхньої температури відбувається не однаково, як за наявності перемішування так і його відсутності. За наявності перемішування температура врівноваження об'єктів відбувається у 57,1% швидше ніж за відсутності перемішування, при цьому значення температури врівноваження для обох випадків є рівним та становить ($T_{cn} = T_{iz} = T_c = T_{cyb} = 35,97$ °C). Результати динамічного аналізу енергетичних витрат під час підігріву субстрату електричним підігрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора для реактора з меншими масо-габаритними характеристиками наведено у (Додатку В.4).

2.4.2. Динамічний аналіз енергетичних витрат під час підігріву субстрату електричним підігрівачем розміщеним у лопатях двоярусної лопатевої мішалки

Виробництво біогазу відбувається у спеціально спроектованих біогазових реакторах при підтримці постійної температури та однорідності зброджуваної сировини (субстрату). У процесі зброджування кількість виділення біогазу залежить від температурного режиму у біогазовому реакторі [78]. Через що, інтенсивність та рівномірність розподілення теплової енергії у об'ємі субстрату що зброджується, відіграє одну з головних ролей у продуктивності біогазового реактора. У роботі [4, 5] наведено результати чисельних досліджень інтенсивності теплового потоку по об'єму субстрату, з врахуванням режиму руху субстрату та

величини налипання твердої фракції на поверхню комбінованої системи перемішування та електричного підігріву. В результаті аналізу результатів зроблено висновок, що збільшення частоти обертання призводить до пришвидшення теплопередачі від нагрітої поверхні до субстрату, а збільшення забруднюючого шару має суттєвий вплив на розповсюдження теплового потоку, що призводить до зниження інтенсивності тепло розподілу. Враховуючи, що за відсутності перемішування налипання часточок субстрату на поверхні відбувається швидше, було прийнято рішення розглядати систему електричного нагріву субстрату разом з системою перемішування, а саме лопатевою двоярусною мішалкою з лопатями розміщеними під кутом 45° , (рис. 2.22) [9].

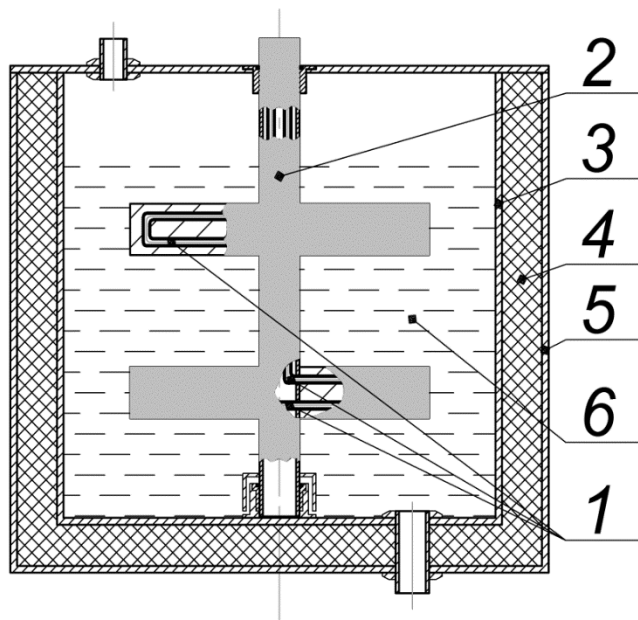


Рис. 2.22. Структурна схема комбінованої системи електричного підігріву вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки [9]: 1 – електричний нагрівальний кабель; 2 – лопатева двоярусна мішалка з лопатями розміщеними під кутом; 3 – біогазовий реактор; 4 – утеплювальний матеріал; 5 – захисний металевий кожух; 6 – субстрат.

Суттєвою перевагою безпосереднього розташування електричного нагрівального пристрою у об'ємі субстрату є високий коефіцієнт корисної дії, рівний $\eta=1$, оскільки все виділене нагрівачем тепло потрапляє до субстрату.

Структурна схема комбінованої системи електричного підігріву

вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки має наступний вигляд (рис. 2.22): електричний нагрівальний кабель (1) вмонтований у лопаті двоярусної лопатевої мішалки (2), котра встановлена у центральній частині біогазового реактора (3), поверх біогазового реактора змонтовано утеплювальний матеріал (4) та закрито захисним металевим кожухом (5) для уникнення механічних пошкоджень та впливу вологи на утеплювальний матеріал [9].

Кожна лопать виступає окремою нагрівальною секцією, всі секції з'єднуються паралельно.

Підчас своєї роботи, до електричного нагрівального кабелю (1) прикладається напруга живлення, що призводить до його нагріву. Оскільки нагрівальний кабель щільно прилягає до внутрішньої стінки лопаті, частина теплової енергії віддається на нагрів самої лопаті, а від лопаті відбувається тепловіддача до субстрату (6), котрий знаходиться у біогазовому реакторі (3) [9].

Розглянемо процес теплової передачі від нагрівального кабелю розміщеного у лопаті до стінки лопаті. Тепловий баланс електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки описується наступним рівнянням [9]:

$$Q_{el} = Q_{cn} + Q_{iz} + Q_l, \quad (2.98)$$

де: Q_{cn} – кількість теплоти необхідної на нагрів спіралі електричного нагрівального кабелю, Дж; Q_{iz} – кількість теплоти необхідної на нагрів ізоляції електричного нагрівального кабелю, Дж; Q_l – кількість теплоти відданої на нагрів лопаті, Дж.

Кількість теплоти виділеної електричним нагрівальним кабелем описується залежністю (2.61). Кількість теплоти необхідної на нагрів спіралі та ізоляції електричного нагрівального кабелю розміщеному у лопатях лопатевої двоярусної мішалки визначаємо за залежностями (2.62) та (2.63). Кількість теплоти переданої на нагрів ізоляції визначаємо за залежністю (2.64).

Кількість теплоти переданої від електричного нагрівального кабелю на нагрів лопаті визначається з залежності:

$$Q_{\text{л}} = k_{\text{л}} \cdot F_{\text{к1}} \cdot \tau \cdot (T_{\text{із}} - T_{\text{л}}), \quad (2.99)$$

де: $k_{\text{л}}$ – коефіцієнт теплопередачі від внутрішньої до зовнішньої стінки лопаті, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $F_{\text{к1}}$ – площа електричного нагрівального кабелю, з якого теплота віддається через стінку лопаті до субстрату, м^2 ; $T_{\text{л}}$ – температура лопаті, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{із}}$ – температура ізоляції електричного нагрівального кабелю, $^\circ\text{C}$.

Електричний нагрівальний кабель безпосередньо розташовується у лопатях перемішуючого пристрою, який у свою чергу встановлений у центральній частині біогазового реактора (рис. 2.22), і тепло, виділене з площі поверхні нагрівального кабелю потрапляє до субстрату, тому площа ($F_{\text{к1}}$) визначається з залежності:

$$F_{\text{к1}} = \pi \cdot \frac{d_{\text{к}}}{2} \cdot 2 \cdot l_{\text{к}}, \quad (2.100)$$

де: $d_{\text{к}}$ – діаметр електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопаті, м ; $l_{\text{к}}$ – довжина електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопаті, м .

Кількість теплоти необхідної на нагрів лопаті визначається з залежності:

$$Q_{\text{л}} = c_{\text{л}} \cdot m_{\text{л}} \cdot (T_{\text{л1}} - T_{\text{л2}}), \quad (2.101)$$

де: $m_{\text{л}}$ – маса лопаті, кг ; $c_{\text{л}}$ – питома теплоємність матеріалу з якого виготовлено лопать, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $T_{\text{л1}}$ – кінцева температура лопаті, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{л2}}$ – початкова температура лопаті, $^\circ\text{C}$.

Коефіцієнт теплопередачі від внутрішньої до зовнішньої стінки лопаті визначаємо з залежності:

$$k_{\text{л}} = \frac{1}{R_1}, \quad (2.102)$$

де: R_1 – термічний опір теплопровідності від внутрішньої до зовнішньої стінки лопаті, $\text{м} \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Термічний опір теплопровідності від внутрішньої до зовнішньої стінки лопаті, враховуючи те, що кабель притиснений між її двома стінками визначається з залежності:

$$R_1 = \frac{\delta_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}}}, \quad (2.103)$$

де: λ_l – коефіцієнт теплопровідності матеріалу з якого виготовлено лопаті, $Bm/(m \cdot ^\circ C)$; δ_l – товщина однієї стінки лопаті, m .

Кількість теплоти переданої з поверхні лопаті на нагрів субстрату визначається з залежності:

$$Q_{cy6} = \alpha_1 \cdot F_l \cdot \tau \cdot (T_l - T_{cy6}) \quad (2.104)$$

де: α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої стінки лопаті до об'єму субстрату, $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$; F_l – площа поверхні лопаті, m^2 ; T_l – температура лопаті, $^\circ C$; T_{cy6} – температура субстрату, $^\circ C$.

Для визначення коефіцієнту тепловіддачі від лопаті до субстрату (α_1) використовуємо залежності (2.12, 2.42–2.44) та залежності наведені у (Додатку В.1 – В.3).

Провівши диференціювання по часу вище наведених залежностей, отримали:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{el}}{d\tau} &= \frac{dQ_{cn}}{d\tau} + \frac{dQ_{i3}}{d\tau} + \frac{dQ_l}{d\tau}; \quad \frac{dQ_{el}}{d\tau} = P; \quad \frac{dQ_{cn}}{d\tau} = c_{cn} \cdot m_{cn} \cdot \frac{dT_{cn}}{d\tau}; \\ \frac{dQ_{i3l}}{d\tau} &= c_{i3} \cdot m_{i3} \cdot \frac{dT_{i3}}{d\tau}; \quad \frac{dQ_{i3}}{d\tau} = k_{i3} \cdot F_k \cdot (T_{cn} - T_{i3}); \\ \frac{dQ_{cy6}}{d\tau} &= \alpha_1 \cdot F_l \cdot (T_l - T_{cy6}); \quad \frac{dQ_l}{d\tau} = k_l \cdot F_{k1} \cdot (T_{i3} - T_l), \end{aligned} \quad (2.105)$$

Тоді, диференційне рівняння зміни температури спіралі нагрівального електричного кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки матиме вигляд [9]:

$$\frac{dT_{cn}}{d\tau} = \frac{P + k_{i3} \cdot F_{cn} \cdot (T_{i3} - T_{cn})}{c_{cn} \cdot m_{cn}}, \quad (2.106)$$

Диференційне рівняння зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки матиме вигляд [9]:

$$\frac{dT_{i3}}{d\tau} = \frac{k_{i3} \cdot F_{cn} \cdot (T_{cn} - T_{i3}) + k_l \cdot F_{k1} \cdot (T_l - T_{i3})}{c_{i3} \cdot m_{i3}}, \quad (2.107)$$

З метою встановлення двопозиційного регулювання температури електричного нагрівального кабелю у процесі моделювання, у залежність (2.106) введено коефіцієнт регулювання (ξ), котрий визначається з залежності (2.76), тоді диференціальне рівняння зміни температури нагрівального електричного кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки набуде наступного вигляду [9]:

$$\frac{dT_{cn}}{d\tau} = \frac{P \cdot \xi + k_{iz} \cdot F_{cn} \cdot (T_{iz} - T_{cn})}{c_{cn} \cdot m_{cn}}, \quad (2.108)$$

Диференціальне рівняння зміни температури лопаті у яку вмонтовано електричний нагрівальний кабель має наступний вигляд [9]:

$$\frac{dT_{\text{л}}}{d\tau} = \frac{k_{\text{л}} \cdot F_{\kappa 1} \cdot (T_{iz} - T_{\text{л}}) + \alpha_1 \cdot F_{\text{л}} \cdot (T_{\text{суб}} - T_{\text{л}})}{c_{\text{л}} \cdot m_{\text{л}}}, \quad (2.109)$$

Оскільки, електричний нагрівальний кабель вмонтований у лопаті притиснений між її двома стінками, тому площа нагрітої поверхні лопаті збільшується у два рази і розраховується за формулою:

$$F_{\text{л}} = 2 \cdot (a \cdot b) + 2 \cdot (a \cdot c), \quad (2.110)$$

де: a – висота лопаті, м; b – ширина лопаті, м; c – товщина лопаті, м.

Тепловий баланс системи «реактор-субстрат» описується рівнянням (2.78).

Кількість теплоти необхідної на нагрів реактора визначається з залежності (2.78). Кількість теплоти необхідної на нагрів субстрату визначається з залежностей (2.33). Коефіцієнт теплопередачі (k_c) через стінку біогазового реактора знаходимо з залежності (2.67). Внутрішня (F_c) та зовнішня (F_{c1}) площі стінки біогазового реактора визначається з залежностей (2.81, 2.82). Площа основи ($F_{осн}$) біогазового реактора визначається з залежності (2.83).

Значення теплового потоку від лопаті з вмонтованим у неї електричним нагрівальним кабелем використовуючи залежності (2.103, 2.107) визначається наступним чином [9]:

$$Q_{нагр} = \frac{T_{iz} - T_{суб}}{R_1 + R_2} \cdot (F_{\text{л}} \cdot n_1), \quad (2.111)$$

де: R_1 – термічний опір теплопровідності від внутрішньої до зовнішньої стінки лопаті, m^0C/Bm ; R_2 – термічний опір теплопровідності у об’ємі субстрату, m^0C/Bm ; n_1 – кількість лопатей механічної мішалки, *шт.*

Термічний опір теплопровідності у об’ємі субстрату визначається з залежності:

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_1}, \quad (2.112)$$

Провівши диференціювання по часу вище наведених залежностей, отримали:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{p-c}}{d\tau} &= \frac{dQ_p}{d\tau} + \frac{dQ_{cyб}}{d\tau} + \frac{dQ_{em}}{d\tau}; \quad \frac{dQ_{p-c}}{d\tau} = Q_{нагр}; \quad \frac{dQ_p}{d\tau} = c_p \cdot m_p \cdot \frac{dT_p}{d\tau} \\ \frac{dQ_{cyб}}{d\tau} &= c_{cyб} \cdot m_{cyб} \cdot \frac{dT_{cyб}}{d\tau}; \quad \frac{dQ_{cyб}}{d\tau} = \alpha_1 \cdot (F_l \cdot n_1) \cdot (T_l - T_{cyб}). \end{aligned} \quad (2.113)$$

Тоді, диференційне рівняння зміни температури субстрату із електричним нагрівальним кабелем вмонтованим у лопаті двоярусної лопатевої мішалки матиме вигляд [9]:

$$\frac{dT_{cyб}}{d\tau} = \frac{Q_{нагр} + \alpha_1 \cdot (F_l \cdot n_1) \cdot (T_l - T_{cyб}) + k_c \cdot (F_c + F_{осн}) \cdot (T_c - T_{cyб})}{c_{cyб} \cdot m_{cyб}}, \quad (2.114)$$

Величина теплових втрат залежить від багатьох умов (2.38), тому залежність зв’язку між тепловими втратами у навколишнє середовище та поверхнею теплообміну циліндричного реактора має наступний вигляд [9]:

$$Q_{em} = k_l \cdot H_1 \cdot \tau \cdot (T_c - T_{навк}), \quad (2.115)$$

де: k_l – лінійний коефіцієнт теплопередачі у навколишнє середовище, $Bm/(m^0C)$; H_1 – висота біогазового реактора, *м.*

Лінійний коефіцієнт теплопередачі у навколишнє середовище для циліндричної стінки за умови розташування нагрівального елементу у середині реактора визначається з залежності:

$$k_l = \frac{1}{R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7}, \quad (2.116)$$

де: R_3 – термічний опір тепловіддачі від субстрату до стінки біогазового реактора, m^0C/Bm ; R_4 – термічний опір теплопровідності від внутрішньої стінки реактора до зовнішньої стінки реактора, m^0C/Bm ; R_5 – термічний опір теплопровідності ізолюючого матеріалу, m^0C/Bm ; R_6 – термічний опір теплопровідності від внутрішньої стінки захисного корпусу ізолюючого матеріалу до зовнішньої стінки захисного корпусу, m^0C/Bm ; R_7 – термічний опір тепловіддачі від зовнішньої стінки захисного корпусу до навколишнього середовища, m^0C/Bm .

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1}, \quad (2.117)$$

$$R_4 = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{cm}} \ln \frac{d_2}{d_1}, \quad (2.118)$$

$$R_5 = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{из.мат}} \ln \frac{d_4}{d_3}, \quad (2.119)$$

$$R_6 = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{cm}} \ln \frac{d_6}{d_5}, \quad (2.120)$$

$$R_7 = \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_6}, \quad (2.121)$$

де: α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки реактора у навколишнє середовище, $Bm/(m^2 \cdot ^0C)$; d_1 , d_2 – внутрішній та зовнішній діаметри біогазового реактора, відповідно, m ; d_3 – внутрішній діаметр ізолюючого матеріалу, m ; d_4 – зовнішній діаметр ізолюючого матеріалу, m ; d_5 – внутрішній діаметр захисного кожуху реактора, m ; d_6 – зовнішній діаметр захисного кожуху реактора, m .

Коефіцієнт теплопередачі у навколишнє середовище для плоскої стінки (k_{bm}) визначається з залежності (2.40). Коефіцієнт тепловіддачі від стінки реактора в навколишнє середовище (α_2) визначаємо з (2.45). Площу тепловіддачі поверхні біогазового реактора визначаємо з залежностей (2.82, 2.83, 2.85). Кількість теплоти необхідної для нагріву системи «реактор-субстрат»

визначається з залежності (2.88).

Диференційне рівняння зміни температури стінки біогазового реактора із електричним нагрівальним кабелем вмонтованим у лопаті двоярусної лопатевої мішалки матиме вигляд [9]:

$$\frac{dT_c}{d\tau} = \frac{k_c \cdot (F_c + F_{очн}) \cdot (T_{суб} - T_c) + k_l \cdot H_1 \cdot (T_n - T_c)}{c_p \cdot m_p}, \quad (2.122)$$

Математична модель для визначення енергетичних витрат підчас підігріву субстрату електричним нагрівальним кабелем вмонтованим у лопаті мішалки набуває наступного вигляду [16-18]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT_{cn}}{d\tau} &= \frac{P \cdot \xi + k_{i3} \cdot F_{cn} \cdot (T_{i3} - T_{cn})}{c_{cn} \cdot m_{cn}}; \\ \frac{dT_{i3}}{d\tau} &= \frac{k_{i3} \cdot F_{cn} \cdot (T_{cn} - T_{i3}) + k_l \cdot F_{к1} \cdot (T_l - T_{i3})}{c_{i3} \cdot m_{i3}}; \\ f(\xi) &= \begin{cases} \xi = 0, & \text{якщо } T_{i3} \geq T_{к.ном} \\ \xi = 1, & \text{якщо } T_{i3} < T_{к.ном} \end{cases}; \\ \frac{dT_l}{d\tau} &= \frac{k_l \cdot F_{к1} \cdot (T_{i3} - T_l) + \alpha_1 \cdot F_l \cdot (T_{суб} - T_l)}{c_l \cdot m_l}; \\ Q_{нагр} &= \frac{T_{i3} - T_{суб}}{R_1 + R_2} \cdot (F_l \cdot n_1); \\ \frac{dT_{суб}}{d\tau} &= \frac{Q_{нагр} + \alpha_1 \cdot (F_l \cdot n_1) \cdot (T_l - T_{суб}) + k_c \cdot (F_c + F_{очн}) \cdot (T_c - T_{суб})}{c_{суб} \cdot m_{суб}}; \\ \frac{dT_c}{d\tau} &= \frac{k_c \cdot (F_c + F_{очн}) \cdot (T_{суб} - T_c) + k_l \cdot H_1 \cdot (T_n - T_c)}{c_p \cdot m_p}. \end{aligned} \right\} \quad (2.123)$$

Отримана математична модель (2.123) дозволяє у повній мірі дослідити динаміку зміни температури кожного об'єкту, твердого або рідко подібного, котре приймає участь у процесі нагріву та визначити кількість енергії необхідної на процес термостабілізації анаеробного бродіння, враховуючи: початкові температури об'єктів, навколишнього середовища, частоту перемішування, режим руху субстрату, температурний режим анаеробного бродіння, швидкість вітру та фізико-хімічні параметри субстрату та об'єктів котрі приймають участь у процесі термостабілізації, тип перемішуючого пристрою та потужність електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті перемішуючого пристрою [9, 16-18].

Використовуючи математичну модель (2.123) проведено динамічний аналіз зміни температури субстрату підчас підігріву електротепломеханічною системою перемішування та електричного підігріву виконаного електричним нагрівальним кабелем, котрий змонтовано у лопатях двоярусної лопатевої мішалки (рис. 2.22).

Метою динамічного аналізу є дослідження процесу зміни температури субстрату та електричного нагрівального кабелю в часі, з подальшим підрахунком витраченої енергії необхідної на нагрів субстрату, який знаходиться у замкненому біогазовому реакторі на $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, при використанні електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву (рис. 2.22) [9].

Динамічний аналіз проводимо за заданими умовами: зброджування субстрату відбувається при мезофільному температурному режимі. $t_{\text{брод}} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, допустиме відхилення температури $t_{\text{дон}} = \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ за годину.

Біогазовий реактор циліндричної форми з наступними геометричними параметрами: висота реактора $H = 0,6\text{ м}$, внутрішній діаметр реактора $d_6 = 0,368\text{ м}$, зовнішній діаметр реактора $d_5 = 0,37\text{ м}$, матеріал біогазового реактора – сталь, коефіцієнт теплопровідності стінки біогазового реактора $\lambda_{\text{ст}} = 50\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; товщина стінки біогазового реактора $\delta_{\text{ст}} = 0,001\text{ м}$, маса реактора разом з нижньою та верхньою кришками $m_p = 60\text{ кг}$, питома теплоємність матеріалу з якого виконано реактор $c_p = 600\text{ Дж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$ [9].

Фізико-хімічні параметри органічного субстрату завантаженого у біогазовий реактор: вологість рівна 90%, коефіцієнт теплопровідності субстрату $\lambda = 0,58\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$ питома густина $\rho_{\text{суб}} = 1000\text{ кг/м}^3$, питома теплоємність $c_{\text{суб}} = 4200\text{ Дж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$, маса субстрату $m_{\text{суб}} = 40\text{ кг}$, динамічна в'язкість $\mu = 0,001004\text{ Па}\cdot\text{с}$, висота субстрату у біогазовому реакторі $l_2 = 0,4\text{ м}$ [9].

Згідно з проведеними теоретичними дослідженнями [3–5, 7, 9] енергоефективна частота обертів робочого органу електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату $n = 40\text{ об/хв}$.

У якості утеплювального матеріалу приймаємо мінеральну вату з наступними параметрами: коефіцієнт теплопровідності ізолюючого матеріалу $\lambda_{із.мат} = 0,037 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, товщина ізолюючого матеріалу $\delta_{із.мат} = 0,1 \text{ м}$, внутрішній діаметр ізолюючого матеріалу $d_4 = 0,37 \text{ м}$, зовнішній діаметр ізолюючого матеріалу $d_3 = 0,57 \text{ м}$. Шар мінеральної вати захищено металевим кожухом з наступними параметрами: зовнішній діаметр захисного кожуху $d_1 = 0,58 \text{ м}$, внутрішній діаметр $d_2 = 0,576 \text{ м}$. Металевий захисний кожух виконано з металу, коефіцієнт теплопровідності якого $\lambda_{см} = 45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, товщина стінки захисного кожуху $\delta_{см} = 0,002 \text{ м}$ [9].

Підігрів виконано електричним нагрівальним кабелем із вуглецевого волокна з ізоляцією із кремнійорганічної гуми марки КН141 з наступними технічними характеристиками: зовнішній діаметр кабелю $d_k = 0,003 \text{ м}$, електричний опір одного метру кабелю $R_k = 141 \text{ Ом}/\text{м}$, діаметр спіралі $d_{сн} = 0,001 \text{ м}$, маса одного метру погонного спіралі $m_{сн} = 0,002 \text{ кг}$, питома теплоємність спіралі $c_{сн} = 1800 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, маса одного метру погонного ізоляції нагрівального кабелю $m_{із} = 0,008 \text{ кг}$, питома теплоємність ізоляції $c_{із} = 4900 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ [9]. Нагрівальний кабель вмонтовано у лопаті лопатевої двоярусної мішалки, кожна лопать є окремою секцією підігріву, всі секції з'єднано паралельно. Кількість відрізків електричного нагрівального кабелю у одній лопаті – 1 шт, довжина одного відрізка $l_k = 5 \text{ м}$. Потужність однієї секції $P_i = 68,6 \text{ Вт}$. Кількість секцій, рівна кількості лопатей мішалки ($n_1 = 4$), сумарна потужність прикладена до нагрівального кабелю становить: $(P = \sum P_i \cdot n_1 = 274,4 \text{ Вт})$. Загальна довжина нагрівального кабелю вмонтованого у 4 лопаті мішалки $l = 20 \text{ м}$. Номінальна температура кабелю $T_{к.ном} = 60 ^\circ\text{C}$.

У дослідженнях [3–5, 7] встановлено, що теплопередача під час перемішування інтенсивніша, через це, прийнято, що під час підігріву

відбувається перемішування. Сумарна маса мішалки разом з лопатями становить $m_M = 11 \text{ кг}$, мішалку виконано із металу, з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_M = 50 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{С)}$. Для проведення динамічного аналізу зміни температури субстрату підчас підігріву комбінованою системою перемішування та електричного підігріву виконаного електричним нагрівальним кабелем, котрий змонтовано у лопатях двоярусної лопатевої мішалки, було використано наступні початкові умови [9]: $T_{cy6}[0] = 34 ^\circ\text{С}$, $T_{cn}[0] = 34 ^\circ\text{С}$, $T_{iz}[0] = 34 ^\circ\text{С}$, $T_{л}[0] = 34 ^\circ\text{С}$, $T_c[0] = 34 ^\circ\text{С}$, $T_{навк} = \text{const} = 7 ^\circ\text{С}$, $v_{sim} = \text{const} = 5 \text{ м/с}$, $P = 274,4 \text{ Вт}$.

Кінцева умова розрахунку: $T_{cy6} = 35,8 ^\circ\text{С}$.

Результати динамічного аналізу представлено у вигляді графічних залежностей на яких зображено: залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю (рис. 2.23); залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю (рис. 2.24); залежність зміни температури лопаті (рис. 2.25), залежність зміни температури субстрату на $1,8 ^\circ\text{С}$, від тривалості підігріву (рис. 2.26) та залежність зміни температури стінки реактора (рис. 2.27) [9].

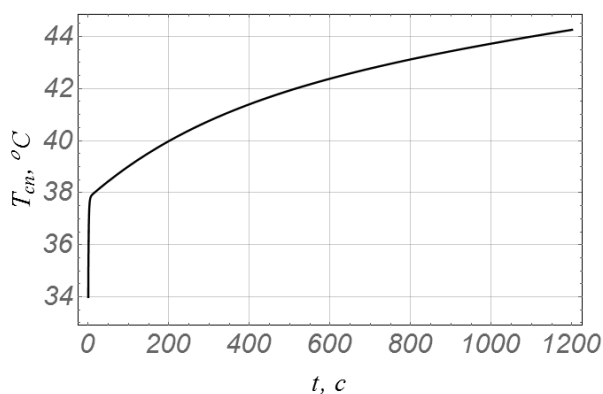


Рис. 2.23. Залежність зміни

температури спіралі електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки від тривалості підігріву

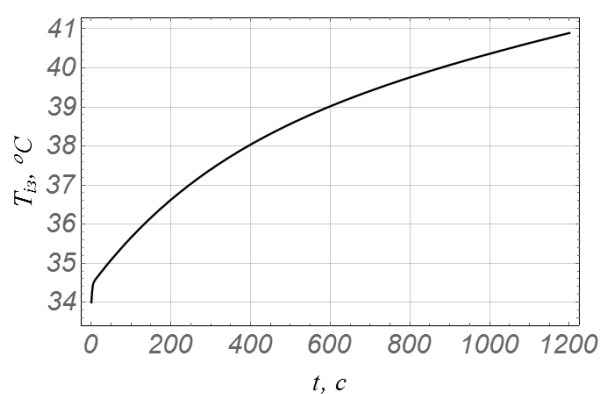


Рис. 2.24. Залежність зміни

температури ізоляції електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки від тривалості підігріву

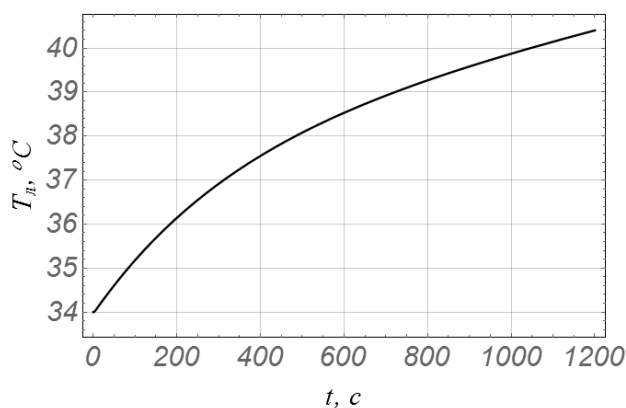


Рис. 2.25. Залежність зміни температури лопаті мішалки від тривалості підігріву

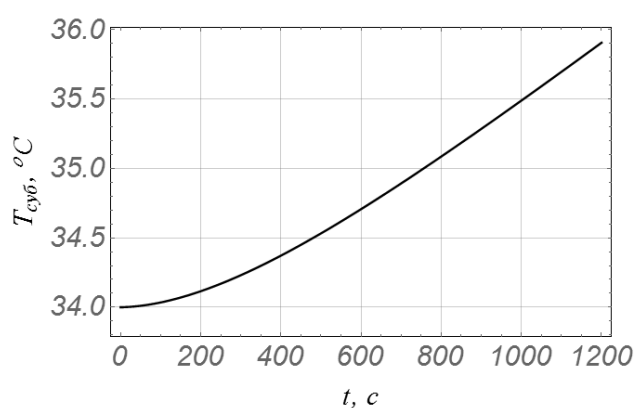


Рис. 2.26. Залежність зміни температури субстрату від тривалості підігріву

Провівши аналіз графічних залежностей зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю (рис. 2.23), температури ізоляції електричного нагрівального кабелю (рис. 2.24), температури лопаті (рис. 2.25), температури субстрату на 1,8 °C, від тривалості підігріву (рис. 2.26) та температури стінки реактора (рис. 2.27), встановлено, що для нагріву субстрату у

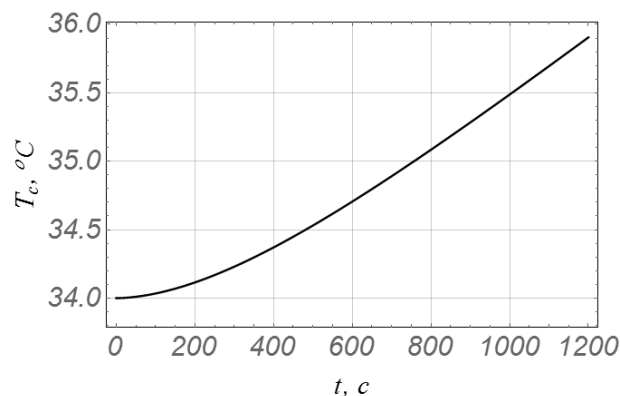


Рис. 2.27. Залежність зміни температури стінки реактора від тривалості підігріву

біогазовому реакторі на 1,8 °C необхідно витратити ($\tau_{нид.2} = 1188$ с). Знаючи час ($\tau_{нид.2}$), визначено енергію, що витрачається на нагрів субстрату у біогазовому реакторі на 1,8 °C, за формулою [9]:

$$W_2 = \sum (P \cdot \Delta t), \quad (2.124)$$

де: P – потужність прикладена до електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки, Вт; Δt – одиниця часу, $\Delta t = 0,001$ с.

У результаті розрахунків (2.124), визначено, що при використанні системи підігріву, що складається з електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки, для нагріву субстрату у біогазовому

реакторі на $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, необхідно витратити $W_2 = 325987,2\text{ Дж}$ [9].

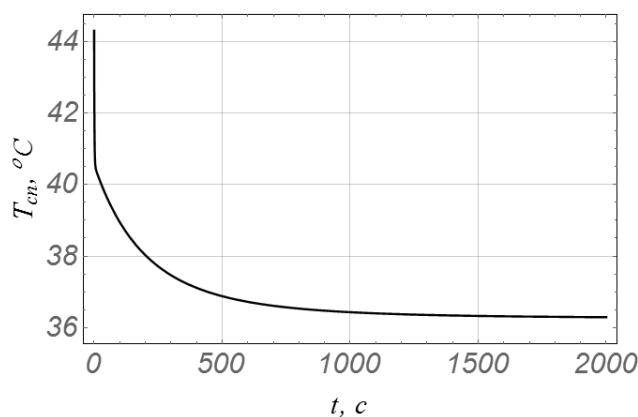
Проведений динамічний аналіз дав змогу встановити кількість енергії необхідної на нагрів об'єму субстрату на $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, який знаходиться у біогазовому реакторі при використанні комбінованої електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву, а також отримати залежності зміни температури спіралі і ізоляції електричного нагрівального кабелю, та повну картину зміни температури усіх об'єктів у процесі термостабілізації анаеробного бродіння [9].

Після завершення процесу підігріву субстрату температура об'єктів є різною, про що свідчать графічні залежності (рис. 2.23 – рис. 2.27), згідно закону термодинамічної рівноваги температура об'єктів протягом певного проміжку часу врівноважується. Проведено динамічний аналіз процесу охолодження об'єктів, за наявності перемішування ($n = 40\text{ об/хв}$) та відсутності ($n = 0\text{ об/хв}$), після завершення процесу підігріву субстрату у біогазовому реакторі за допомогою комбінованої системи перемішування та електричного підігріву вмонтованого у лопаті мішалки. Метою динамічного аналізу процесу охолодження є дослідження процесу зміни температури та визначення тривалості процесу врівноваження температури об'єктів.

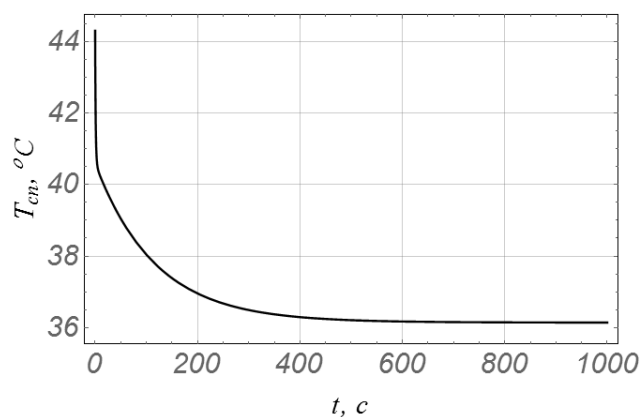
Початкові умови: $T_{cn}[0] = 44,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{iz}[0] = 40,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{л}[0] = 40,4\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 $T_{cyб}[0] = 35,91\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_c[0] = 35,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v_{\text{сим}} = \text{const} = 5\text{ м/с}$, $P = 0\text{ Вт}$,
 $T_{\text{навк}} = \text{const} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Кінцева умова розрахунку: $T_{cn} = T_{iz} = T_{л} = T_{cyб} = T_c$.

Результати динамічного аналізу представлено у вигляді графічних залежностей, на яких зображено: залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю (рис. 2.28); залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю (рис. 2.29); залежність зміни температури лопаті (рис. 2.30), залежність зміни температури субстрату (рис. 2.31) та залежність зміни температури стінки біогазового реактора (рис. 2.32).

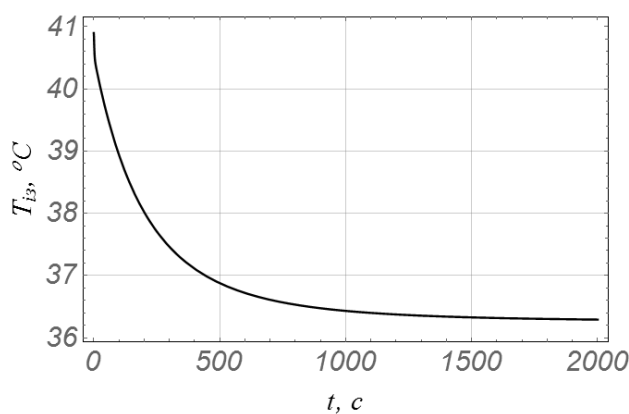


а)

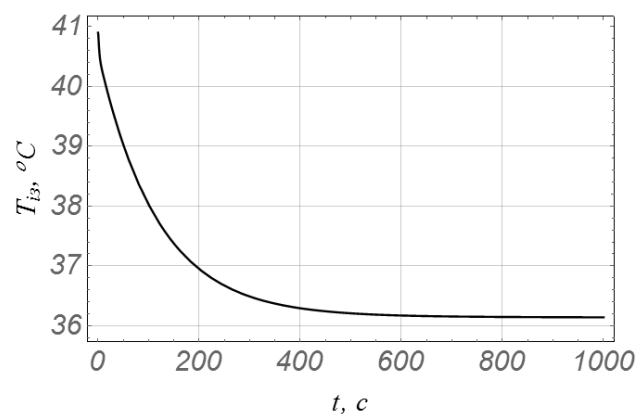


б)

Рис. 2.28. Залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті мішалки від тривалості охолодження: а) без перемішування, б) з перемішуванням



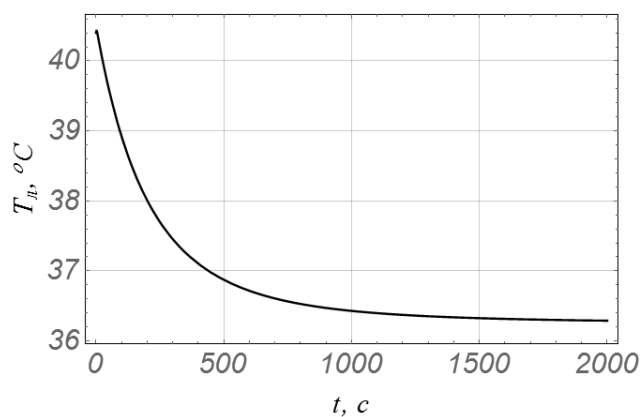
а)



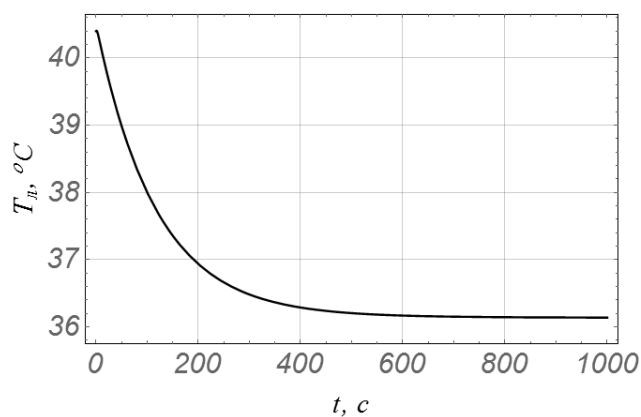
б)

Рис. 2.29. Залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті мішалки від тривалості охолодження: а) без перемішування, б) з перемішуванням

Розглянувши графічні залежності зміни температури спіралі та ізоляції електричного нагрівального кабелю (рис. 2.28 а, б) та (рис. 2.29 а, б) помітно, що у момент часу ($\Delta t = 0 \dots 5$ с) зниження температури спіралі має лавиноподібний характер, тоді як температура ізоляції та лопатей (рис. 2.30 а, б), зменшується за гіперболічною характеристикою. Для об'єктів розглянутих в динамічному аналізі, за наявності перемішування охолодження відбувається у 55,6% швидше ніж за відсутності перемішування.



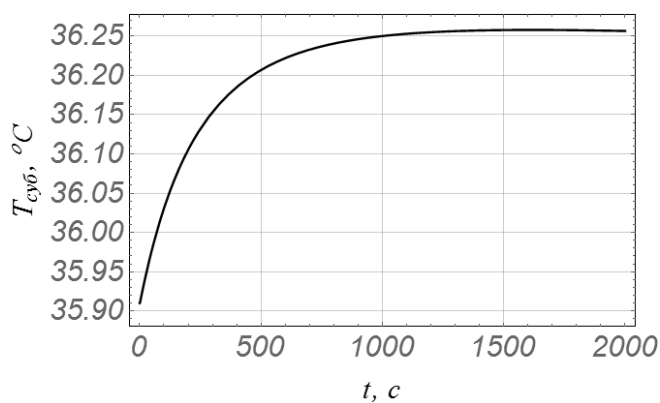
а)



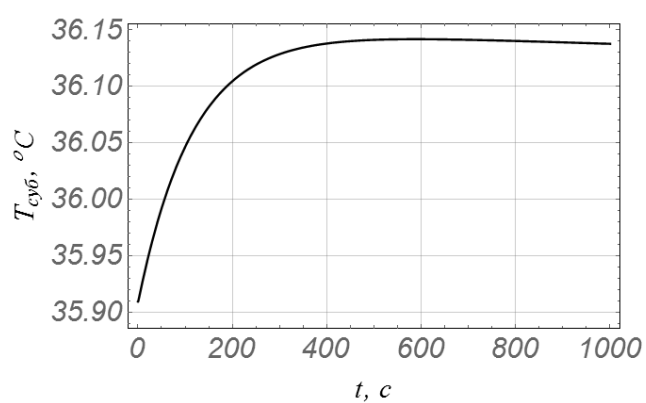
б)

Рис. 2.30. Залежність зміни температури лопаті мішалки від тривалості охолодження:

а) без перемішування, б) з перемішуванням



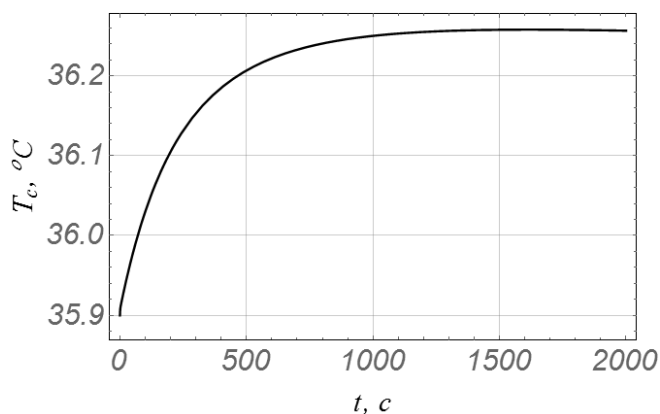
а)



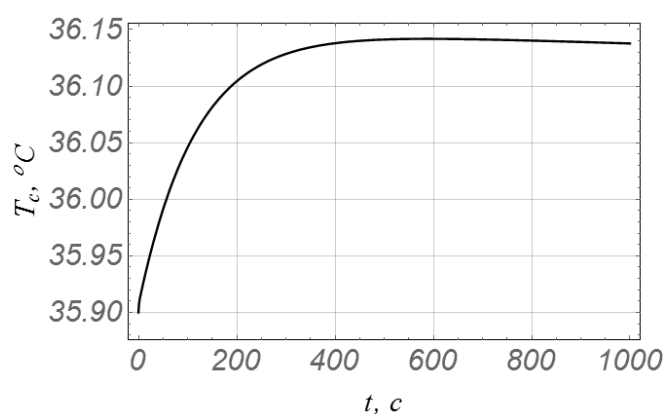
б)

Рис. 2.31. Залежність зміни температури субстрату від тривалості охолодження:

а) без перемішування, б) з перемішуванням



а)



б)

Рис. 2.32. Залежність зміни температури стінки реактора від тривалості охолодження:

а) без перемішування, б) з перемішуванням

Аналізуючи графічні залежності зміни температури субстрату (рис. 2.31 а), та стінки реактора (рис. 2.32 а) від тривалості охолодження за відсутності перемішування, можна зробити висновок, що у момент часу ($t = 1800 \text{ c}$) температура врівноважилась і стала рівною ($T_{cn} = T_{iz} = T_{л} = T_{cyб} = T_c = 36,26 \text{ }^{\circ}\text{C}$) тоді як, за наявності перемішування (рис. 2.31 б) та (рис. 2.32 б) процес врівноваження температури відбувся швидше і у момент часу ($t = 800 \text{ c}$), температура стала рівною ($T_{cn} = T_{iz} = T_{л} = T_{cyб} = T_c = 36,14 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Аналіз графічних залежностей показав, що за відсутності перемішування температура врівноваження об'єктів відбувається у 55,6% повільніше ніж за наявності перемішування, при цьому, значення температури більше на $0,12 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Це пояснюється режимом руху речовини та значеннями коефіцієнтів тепловіддачі. За відсутності перемішування, електричний нагрівальний кабель вмонтований у лопаті мішалки віддає своє тепло до стінки лопаті швидше, ніж тепло передається у об'єм субстрату. З погляду енергетичної ефективності тривалість врівноваження температури об'єктів більша на 55,6%, що у свою чергу забезпечує підтримку вищого значення середньої температури субстрату за добу. Беручи до уваги, що більша тривалість врівноваження температури об'єктів призводить до меншої кількості вмикань підігріву за добу, при цьому у процесі охолодження не використовується електрична енергія на процес перемішування, тому можна зробити висновок, що ефективніше використовувати саме охолодження електротепломеханічної системи підігріву за відсутності перемішування [9].

Результати динамічного аналізу енергетичних витрат підчас підігріву субстрату електричним підігрівачем розміщеним у лопатях електротепломеханічної системи для біогазового реактора з меншими масо-габаритними характеристиками наведено у [9] та у (Додатку В.5).

Висновки до другого розділу

Проведені теоретичні дослідження дозволили провести пошук енергетично ефективної конструкції електротепломеханічної системи для перемішування та

електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі. Розраховані раціональні конструктивні особливості електротепломеханічної системи, що призводить до зменшення споживання енергії.

1. Розроблено математичну модель з метою визначення енергетичних витрат необхідних для перемішування субстрату у біогазовому реакторі у робочі та пускові моменти руху мішалки.

2. Проведено порівняльний аналіз тихохідних механічних мішалок з метою вибору раціонального типу механічного перемішуючого пристрою для створення комбінованої системи для перемішування та електричного підігріву.

3. Встановлено, що використання двоярусної лопатевої мішалки, у якої по дві лопаті на ярус, котрі встановлені під кутом 45^0 потребує найменшої кількості енергії на перемішування субстрату та за такого нахилу лопатей разом з радіальними потоками у середовищі, що переміщується створюються також осьові потоки.

4. Проведено 3D моделювання з метою 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.

5. Виявлено закономірність, що підвищення частоти обертання зменшує тривалість періоду встановлення усталеного значення робочої потужності.

6. В ході проведених досліджень було встановлено, що залежність кількості витраченої енергії на один повний цикл перемішування субстрату при збільшенні частоти обертання, відповідає степеневій функції $P = f(\omega^\alpha)$.

7. На основі отриманих картин траєкторії переміщення елементарних об'ємів та швидкостей потоків субстрату у трьохвимірному просторі встановлено енергетично ефективний рівень швидкості перемішуючого органу електротепломеханічної системи.

8. Визначено частоту обертання за якої відбувається поєднання раціональних значень потужності перемішувача та значення теплового потоку від поверхні нагрівального пристрою.

9. Розроблено рівняння теплового балансу реактора за наявності в ньому, електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву.

10. Встановлено, що втрата тепла у навколишнє середовище для різних об'ємів реакторів, не залежно від температури навколишнього середовища та наявності або відсутності утеплювального шару має не лінійний характер.

11. В ході проведених досліджень було виявлено, що наявність забруднення на стінках біогазового реактора створює додаткову перешкоду для проходження тепла, як з біогазового реактора у навколишнє середовище так і навпаки.

12. Встановлено, що зі збільшенням частоти обертання електротепломеханічної системи коефіцієнт тепловіддачі та зростання значення теплового потоку мають не лінійний характер, як для нагрівачів із забрудненням поверхні так і без.

13. На основі отриманих залежностей зміни температури субстрату та елементів електротепломеханічної системи було встановлено, що врівноваження температури об'єктів відбувається не однаково, як за наявності перемішування так і його відсутності.

14. В ході проведення досліджень було встановлено, що енергетично ефективніше використовувати охолодження електротепломеханічної системи підігріву за відсутності перемішування.

15. Розроблено математичну модель за якою проведено динамічний аналіз витрати енергії на процес термостабілізації субстрату при підігріві електричним нагрівальним кабелем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора. Отримано графічні залежності зміни температури об'єктів та визначено кількість енергії витраченої на один цикл нагріву субстрату.

16. Розроблено математичну модель за якою проведено динамічний аналіз витрат енергії на процес термостабілізації об'єму субстрату при підігріві електричним нагрівальним кабелем розміщеним 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.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ ТА ПІДГРІВУ СУБСТРАТУ

3.1. Обґрунтування вибору методу експериментальних досліджень

Виходячи з поставленої мети та очікуваних результатів експериментальних досліджень енергетичної ефективності електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату під час процесу метанового зброджування останнього, можливо виділити два методи, а саме, дослідження у проточному та періодичному режимах.

Проведення дослідження у проточному режимі дають можливість повноцінно оцінити та встановити оптимальний технологічний режим та отримати найбільш можливі стабільні показники швидкості виходу біогазу. У ході таких досліджень створюються сприятливі умови для відслідковування зміни показників фізико-хімічного складу органічного субстрату у процесі бродіння та їх вплив на швидкість утворення біогазу. Змінюючи час перебування органічного субстрату у біогазовому реакторі та величину органічного завантаження, можна дослідити кінетичні та динамічні параметри процесу метаноутворення. А також, провести дослідження гранично допустимих режимів, при яких відбувається повне розбалансування процесу анаеробного бродіння.

Недоліками даного методу можна вважати складність оцінки розкладання органічного субстрату у процесі анаеробного бродіння. Можливо зробити оцінку лише фактичного ступеню розкладання, що не дає повноцінної картини про можливість утворення більшої кількості біогазу, при повному розпаді органічної речовини. Крім того, проточні біогазові реактори потребують постійного внесення свіжої органічної речовини та утилізації вивантаженого шламу, що у свою чергу, потребує великої кількості сировини та довготривале розміщення експериментальної установки у безпосередній близькості до тваринницьких

підприємств.

Дослідження у періодичному режимі, передбачають витримування заздалегідь підготовлених органічних субстратів у біогазових реакторах при встановленому температурному режимі протягом певного проміжку часу, який залежить від задач наукових досліджень. При цьому, додавання свіжого субстрату та видалення відпрацьованого шламу не відбувається. Підчас періодичного режиму зброджування з'являється можливість дослідити вплив на процес бродіння зовнішніх факторів, таких як: температура навколишнього середовища, гідродинамічний режим, процес перемішування та підігріву субстрату, фізико-хімічного впливу на стабільність біогазового процесу та швидкість утворення біогазу. Можливо створити сприятливі умови для оцінки вмісту метану у об'ємі виробленого біогазу та ступінь розкладання органічної речовини підчас анаеробного бродіння. Також, підчас періодичного режиму, можливо дослідити рівномірність розповсюдження теплового поля по об'єму субстрату і кількість витраченої електричної енергії на процес перемішування та підігріву субстрату, як за добу так і, протягом тривалого циклу зброджування і оцінити енергетичну ефективність системи перемішування та підігріву.

Дослідження процесу анаеробного бродіння використовуючи періодичний метод є порівняно недорогим та придатним для ефективного порівняльного аналізу енергетичної ефективності при використанні різних способів перемішування та підігріву субстрату у біогазовому реакторі. Окремо, можна встановити ефективність використання типів підігріву та перемішування субстрату по зниженню вартості 1 м³ виробленого біогазу.

Оскільки, відсутній процес завантаження свіжої сировини та вивантаження відпрацьованого субстрату, недоліком періодичного методу зброджування є неможливість оцінки впливу фізико-хімічного складу свіжої завантаженої органічної сировини на процес бродіння. Таким чином, показники виходу біогазу у періодичному режимі, можуть не відповідати показникам при використанні проточного режиму. Не зважаючи на це, дослідження процесу анаеробного бродіння органічного субстрату у періодичному режимі дозволяє дослідити

енергетичну ефективність процесів інтенсифікації біогазового виробництва, а саме: підігріву та перемішування та вирішити поставлені задачі дослідження, тому його реалізовано у даній роботі.

Беручи до уваги той факт, що підчас зброджування органічного субстрату відбувається виділення тепла, при проведенні порівняльних експериментальних досліджень кількості витраченої енергії на процес підігріву речовини у реакторі, доцільно використовувати у якості дослідного субстрату – органічну речовину розбавлену чистою водою без додавання інокулянту. При цьому, виключається ймовірність появи похибки експериментальних досліджень, яка пов'язана з процесом виділення тепла при інтенсивному зброджуванні субстрату.

3.2. Програма експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводилися на створеній фізичній моделі біогазової установки, конструкція якої забезпечувала отримання робочих показників, необхідних для порівняльного аналізу енергетичної ефективності різних систем підтримки постійної температури анаеробного бродіння.

Метою проведення експериментальних досліджень біогазового реактора з електротепломеханічним пристроєм для перемішування та електричного підігріву субстрату є перевірка отриманих теоретичним шляхом значень енергетичної ефективності та порівняння їх з даними отриманими експериментальним шляхом на створеній фізичній моделі біогазового реактора.

Досліджувалися дві системи підтримки постійної температури анаеробного бродіння, «класичної» – прокладений на зовнішній поверхні стінки біогазового реактора електричний нагрівальний кабель з одночасним перемішуванням лопатевою мішалкою та «раціональної» – електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву субстрату.

Програма експериментальних досліджень створеної фізичної моделі передбачає наступні етапи:

- розробка фізичної моделі біогазового реактора з

електротепломеханічною системою для перемішування та електричного підігріву субстрату;

- підбір необхідного обладнання для виготовлення електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву субстрату;

- виготовлення експериментальної установки біогазового реактора з електротепломеханічною системою для перемішування та електричного підігріву субстрату;

- підбір вимірювально-реєструючого обладнання для визначення основних енергетичних параметрів при використанні «класичної» та «раціональної» систем підігріву;

- розробка алгоритму автоматичної системи реєстрації та керування електротепломеханічною системою перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі;

- виготовлення блоку автоматичного реєстрації та керування процесами перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі;

- планування експериментальних досліджень для визначення енергетичних параметрів при використанні «класичної» та «раціональної» систем підігріву.

3.3. Опис експериментальної біогазової установки

Під час розробки фізичної моделі та виготовлення експериментальної установки біогазового реактора з електротепломеханічною системою для перемішування та електричного підігріву субстрату, необхідно особливу увагу приділяти конструктивним параметрам, котрі після виготовлення набудуть статусу постійних факторів, які не можливо змінювати у ході анаеробного бродіння.

З метою проведення експериментальних досліджень, розроблено та створено фізичну модель біогазової установки з електротепломеханічною

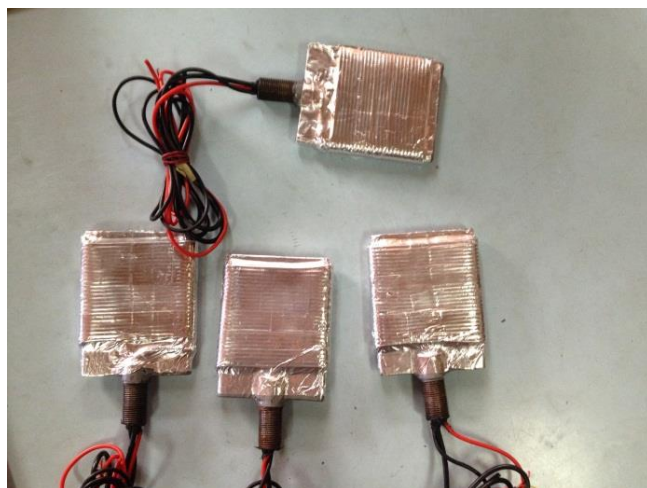
системою для перемішування та електричного підігріву субстрату, яка зображена на (рис. 3.1). На біогазову установку отримано патент України на корисну модель [10] та патент України на винахід [11].



Рис. 3.1. Зовнішній вигляд експериментальної біогазової установки

Для виготовлення біогазового реактора взято сталеву бочку з наступними геометричними параметрами: $H=0,6$ м, $d=0,37$ м, $V=0,06$ м³. Масо-габаритні характеристики експериментальної установки та електротепломеханічної системи наведено у таблиці Г.1 та Г.2, (Додаток Г.1 та Г.2). Утеплення реактора виконано шаром мінеральної вати товщиною 100 мм. Технічна характеристика мінеральної вати наведена у таблиці Г.3 (Додаток Г.3). Для забезпечення захисту утеплювального шару від потрапляння вологи та механічних пошкоджень, поміщено у ще одну сталеву бочку більшого діаметру [16-18].

Вал електротепломеханічної системи перемішування та підігріву виконано із порожнистої сталеві труби. Лопаті виготовлено із сталевих пластин з внутрішніми пазами у яких розміщено електричний гнучкий нагрівальний кабель із вуглецевого волокна (рис 3.2). Технічна характеристика кабелю наведена у (Додатку Г.4).



а)



б)

Рис. 3.2 Лопаті у яких розміщено електричний гнучкий нагрівальний кабель:

а) розташування нагрівального кабелю на лопаті; б) лопать зі встановленим захисним кожухом

Зовнішній вигляд виготовленої електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату наведено на (рис. 3.3).

З метою забезпечення встановлення відповідного кута нахилу лопатей, кріплення останніх до порожнистого валу виконано за допомогою різьбового

з'єднання (рис. 3.4), до попередньо приварених порожнистих штирів із нарізаною різьбою.



Рис. 3.3. Зовнішній вигляд виготовленої електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву

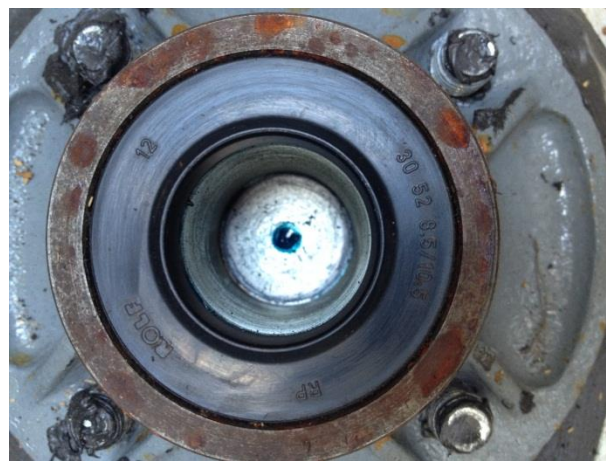


Рис. 3.4. Зовнішній вигляд кріплення лопатей до порожнистого валу електротепломеханічної системи

Вал електротепломеханічної системи у нижній частині біогазового реактора відцентрований у втулці з полімерного матеріалу із сальниковим ущільнювачем, яка захищена захисним стаканом (рис. 3.5). Захисний стакан унеможливує потрапляння бруду у втулку навіть у періоди динамічних навантажень, які виникають у процесі перемішування субстрату.



а)



б)

Рис. 3.5. Кріплення електротепломеханічної системи у нижній частині біогазового реактора: а) нижній кінець валу з захисним стаканом; б) нижня опора валу із втулкою та сальниковим ущільнювачем встановлена на дні біогазового реактора

У верхній кришці біогазового реактора вал відцентрований у підшипниковому вузлі захищеному сальниковими ущільнювачами.



Рис. 3.6. Рухомі контакти

У верхньому кінці валу розміщеному зовні біогазового реактора встановлено рухомі контакти (рис. 3.6), через які підведена напруга живлення до електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопатях та порожнистому валу, а також до датчиків температури встановлених у лопатях.

Під час виготовлення елементів експериментальної установки всі зварювальні роботи виконано ручним напівавтоматичним електродуговим зварюванням у середовищі захищених газів. При цьому використовувався зварювальний дріт марки Св-08Г2С та газ CO_2 .

Для приводу електротепломеханічної системи перемішування та підігріву обрано однофазний асинхронний електродвигун Techtop МУ 631-4 В14 з номінальною потужністю 0,12 кВт та частотою обертання ротора 1400 об/хв.

Технічна характеристика однофазного асинхронного електродвигуна наведена у таблиці Г.5, (Додаток Г.5). Електричний двигун з'єднано з редуктором марки NMRV40-40 з передаточним числом 40. Технічна характеристика редуктора наведена у таблиці Г.6, (Додаток Г.5). Передача потужності від валу електричного двигуна до валу електротепломеханічної системи виконана за допомогою пасової передачі. Частота обертання валу електротепломеханічної системи складає 40 об/хв. Розрахунок та вибір пуско-захисного електрообладнання для керування асинхронним електродвигуном та секціями електричного нагрівального кабелю виконано за методикою наведеною у [173], розрахунок наведено у (Додатку Г.5.1–Г.5.5). Місце встановлення електродвигуна-редуктора на експериментальній установці наведено на рис. 3.7.



Рис. 3.7. Електродвигун-редуктор

Розроблена експериментальна установка дає можливість проводити повноцінні довготривалі експериментальні дослідження з визначенням енергетичного споживання на процеси перемішування і електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі та утвореного об'єму біогазу при використанні різноманітних видів субстратів (відходи харчової промисловості, птахівництва, тваринництва, рибних господарств та інше).

3.4. Вимірювальне обладнання для проведення експериментальних досліджень на фізичній моделі біогазового реактора

В основу експериментальних досліджень енергетичної ефективності використання електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву субстрату у вертикальному біогазовому реакторі періодичної дії покладено: визначення енергетичної ефективності запропонованої електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву; визначення рівня спожитої електричної енергії на підтримку технологічного процесу у встановлених межах для мезофільного температурного режиму; визначення рівномірності розподілення температури по всьому об'єму субстрату у біогазовому реакторі; визначення впливу температури та вологості навколишнього середовища на зміну енергоспоживання на підтримку технологічного процесу анаеробного бродіння; зміну температури у прошарку органічного субстрату від стінки реактора до його центру; визначення величини втрат теплової енергії у навколишнє середовище через стінки біогазового реактора у процесі анаеробного бродіння органічного субстрату за умови перемішування та одночасного підігріву, перемішування без підігріву та за статичного режиму (відсутнє перемішування та підігрів); дослідження зміни струмових характеристик у період пуску електроприводу перемішуючого пристрою та часу виходу останнього на стабільну частоту обертання.

Виходячи з низки цілей, для проведення експериментальних досліджень енергоефективності використання електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву субстрату у вертикальному реакторі періодичної дії, підібрано високоточне електронне вимірювальне обладнання [19], схема розташування вимірювальних датчиків наведена на рис. 3.8.

Датчики температури субстрату (1) та температури лопатей (2) дзеркально розташовані з іншого боку біогазового реактора (14).

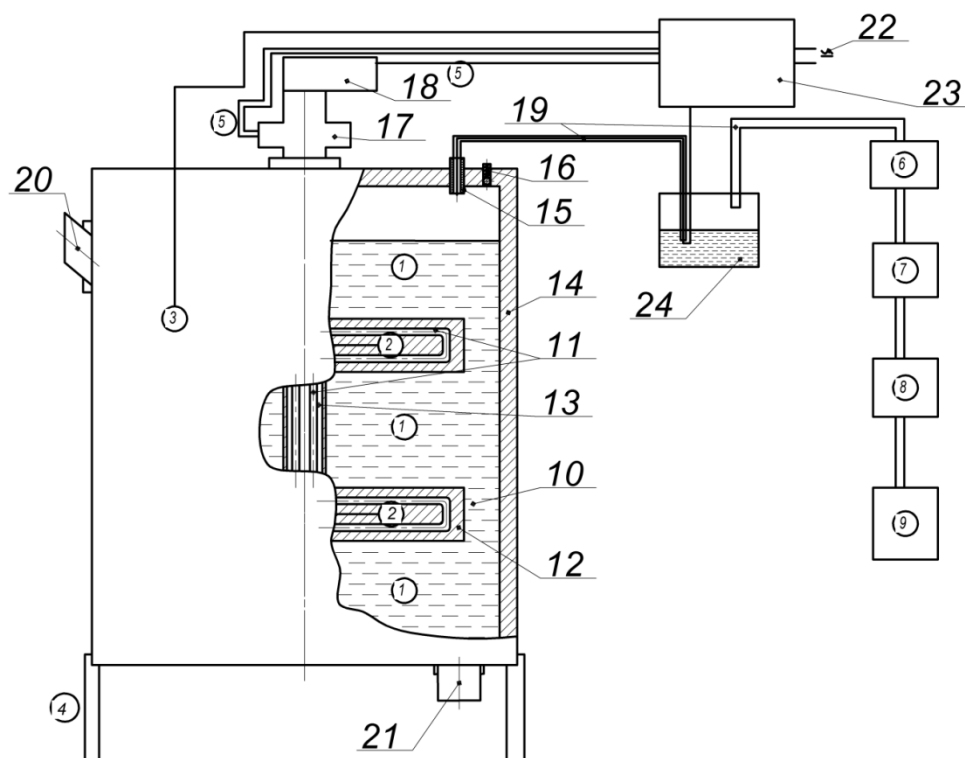


Рис. 3.8. Схема розташування вимірювальних датчиків: 1 – датчики температури субстрату; 2 – датчики температури лопатей; 3 – датчик температури на стінці реактора; 4 – датчик температури та вологості навколишнього середовища; 5 – трансформатори струму; 6, 7 – датчик вмісту метану та вуглекислого газу; 8 – датчик температури біогазу; 9 – датчик тиску; 10 – субстрат; 11 – електричний нагрівальний кабель; 12 – лопать; 13 – вал електротепломеханічної системи; 14 – біогазовий реактор; 15 – штуцер відведення біогазу; 16 – аварійний клапан тиску; 17 – рухомі контакти; 18 – електродвигун-редуктор; 19 – газопровід; 20 – канал завантаження субстрату; 21 – канал вивантаження відпрацьованого субстрату; 22 – джерело живлення; 23 – блок автоматичного керування; 24 – водяний замок.

Одним з головних критеріїв оцінки енергетичної ефективності біогазової установки є величина спожитої електричної енергії електричними нагрівачами розміщеними у лопатях та електроприводом перемішуючого пристрою, яку у ході експериментальних досліджень вимірювали трансформаторами струму SCT-013-030, після чого аналітичним методом визначали величину спожитої потужності. Місце встановлення трансформаторів струму наведено на рис. 3.9, технічну

характеристику наведено у (Додатку Г.6).

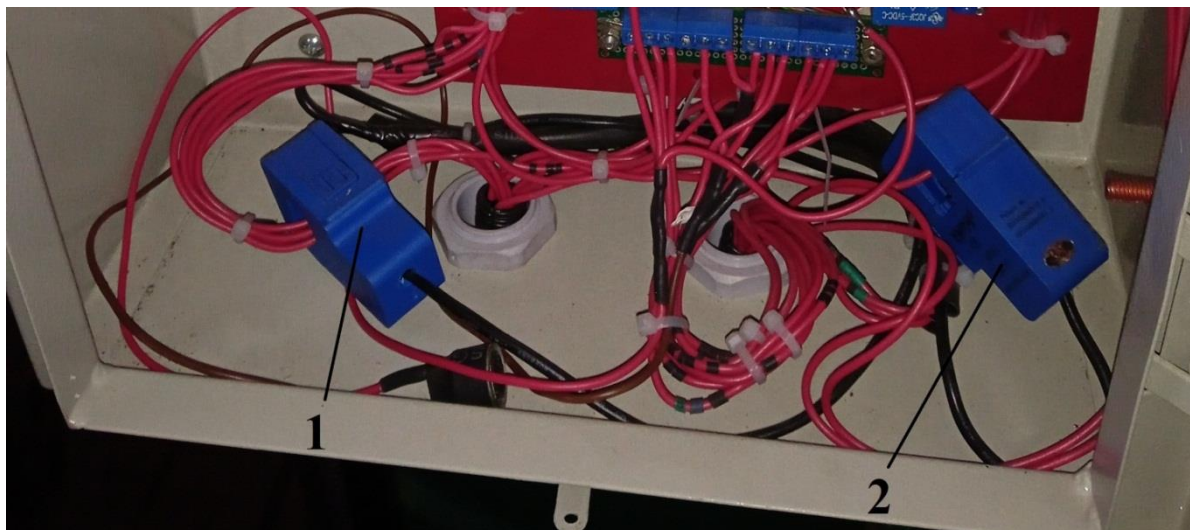


Рис. 3.9. Місце встановлення трансформаторів струму SCT-013-030.

1 –електричних нагрівачів; 2 –однофазного асинхронного електричного двигуна

Зміни параметрів клімату навколишнього середовища створюють суттєвий вплив на теплові процеси у реакторі, через що, у ході експериментальних досліджень проводимо вимірювання температури та вологості зовнішнього повітря за допомогою цифрового датчика температури та вологості DHT11, місце встановлення наведено на рис. 3.10, технічна характеристика наведена у (Додатку Г.7).



Рис. 3.10. Місце встановлення аналогового датчика температури та вологості DHT11

Також на основі виміряної зміни температури та вологості зовнішнього повітря досліджено величину теплових втрат у навколишнє середовище та зміну температури у прошарках органічного субстрату від стінки біогазового реактора до його центру.

Біогазовий реактор розташований у кліматичній зоні

навколишнього середовища. Для визначення величини втрат теплової енергії у навколишнє середовище через стінки біогазового реактора у процесі анаеробного бродіння за умови перемішування та одночасного підігріву, перемішування без підігріву та за статичного режиму (відсутнє перемішування та підігрів) на зовнішні стінки біогазового реактора закріплено аналогові вологозахищені датчики температури DS18B20, місце розташування наведено на рис. 3.11, технічна характеристика у (Додатку Г.8).



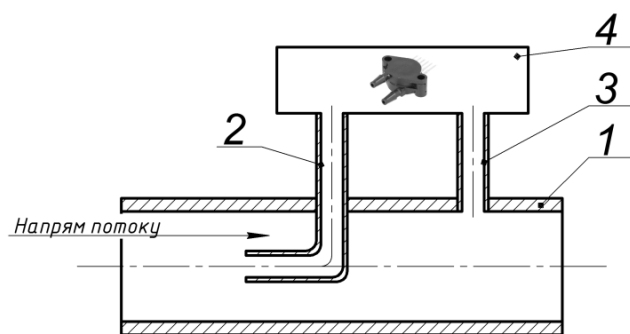
Рис. 3.11. Місце встановлення вологозахищеного датчика температури на стінці біогазового реактора DS18B20

Найбільш важливою частиною наукової роботи є експериментальні дослідження. У ході проведення експериментальних досліджень електротехнічних, фізико-хімічних, теплових та інших процесів у біогазових технологіях головним критерієм оцінки ефективності, того чи іншого обладнання та процесів на які воно впливає, є визначення об'єму виробленого біогазу протягом усього циклу анаеробного зброджування органічного субстрату.

З метою визначення виробленого об'єму біогазу підчас проведення експериментальних досліджень використовується метод [12] вимірювання потоку біогазу у поєднанні трубки Піто, датчика температури біогазу та диференціального датчика тиску MPX5010DP. Місце встановлення пристрою наведено на рис. 3.12, технічна характеристика диференціального датчика тиску наведено у (Додатку Г.9).



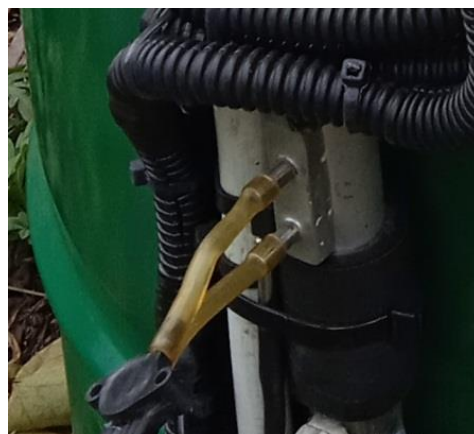
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.12. Пристрій для визначення утвореного об'єму біогазу: а) вигляд збоку; б) конструкція пристрою для визначення утвореного об'єму біогазу: 1 – газопровід; 2, 3 – трубки вимірювання динамічного та статичного тисків; 4 – датчик диференціального тиску; в) вигляд з переду; г) місце встановлення пристрою

Під час ферментації органічного субстрату виділяється біогаз до складу якого входять [41, 172]: сірководень (H_2S), аміак (NH_3), азот (N_2), водень (H_2), та найбільшу частку мають вуглекислий газ CO_2 та метан CH_4 , який є основною хімічною сполукою, що характеризує чистоту газу, ефективність горіння та тепловіддачу. Для вимірювання вмісту метану у виробленому об'ємі біогазу використовуємо портативний шахтовий газоаналізатор АМТ-03, технічна характеристика якого наведена у (Додатку Г.10) та датчик газу MQ-4, а для вимірювання вмісту вуглекислого газу використано датчик MQ-135. Місце встановлення датчиків, наведено на рис. 3.13, технічна характеристика датчику

MQ-4 наведена у (Додатку Г.11), а MQ-135 у (Додатку Г.12).



Рис. 3.13 Місце встановлення датчиків: 1 – датчик температури біогазу, 2 – датчик вуглекислого газу MQ-135, 3 – датчик метану MQ-4

Підчас зброджування органічного субстрату у біогазовому реакторі відбувається поступове розшарування рідкої та твердої фракцій, це викликано природнім ущільненням переробленої маси та наявністю у останній домішок (малого каміння, піску, металевих домішок та ін.). Оскільки, відповідно до рівняння теплової рівноваги будь-яка речовина намагається вирівняти власну температуру до температури середовища в якому вона знаходиться, головним в даному випадку критерієм є питома теплопровідність, яка у свою чергу залежить від фізико-хімічного складу речовини. Відповідно до цього, під час

розшарування органічного субстрату на тверду та рідку фракції відбувається не рівномірне прогрівання речовини, що негативно впливає на розвиток гідролізних, кислоутворюючих та метаноутворюючих (*Methanomicrobium*, *Methanosarcina*, *Methanosaeta*) бактерій та, як наслідок, стабільність виходу біогазу. Через що, датчики температури розташовуємо по всьому об'єму субстрату у вертикальній та горизонтальній площинах, (рис. 3.14), це дозволяє визначити рівномірність розподілення температури та виявлення відхилення останньої по окремим віддаленим ділянкам субстрату від нагрівальної лопатки з метою визначення ефективного енергетичного режиму перемішування та тривалості підігріву з використанням електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву. Для вимірювання температури по об'єму субстрату у біогазовому реакторі використовуємо аналогові вологозахищені датчики температури DS18B20, технічна характеристика у (Додатку Г.8).



Рис. 3.14. Місце встановлення датчиків температури у об'ємі субстрату, а) яруси вимірювальних датчиків у об'ємі реактора; б) позначення ярусів вимірювальних датчиків температури: 1 – верхній ярус, 2 – середній ярус, 3 – нижній ярус.

Стабільність показів вимірювальних датчиків прямопропорційно залежить від стабільності напруги їх живлення. Тому, з метою визначення впливу напруги



Рис. 3.15. Блок живлення
PeakTech 6225A

живлення на покази вимірювального обладнання проведено експериментальне дослідження різних блоків живлення, результати наведено у [14].

Під час експериментальних досліджень, живлення вимірювального обладнання виконувалося від лабораторного блоку живлення PeakTech 6225A, (рис. 3.15) з вихідною напругою від 0 до 30 В постійного струму, з похибкою стабілізації 0,01 %, технічна характеристика наведена у (Додатку Г.13).

Тарування вимірювальних датчиків проводилося за допомогою високоточного обладнання PeakTech, цифрового мультиметра PeakTech 2005 та осцилографа [14].

3.5. Автоматичне керування електротепломеханічною системою та зчитування інформації з вимірювального обладнання

Тривалість експериментальних досліджень енергетичної ефективності процесів інтенсифікації анаеробного зброджування субстрату у біогазовому реакторі складає 7 днів для одного етапу дослідження. Враховуючи тривалість експериментальних досліджень та швидкоплинність процесів у біогазовому реакторі з метою отримання повної картини зміни процесів котрі відбуваються протягом усього циклу анаеробного бродіння було розроблено та створено на базі Arduino систему автоматичного безперервного контролю та реєстрації інформації зі збереженням на карти пам'яті з вимірювального обладнання [13]. Зовнішній вигляд створеної системи безперервного контролю та реєстрації інформації наведено на рис. 3.16.

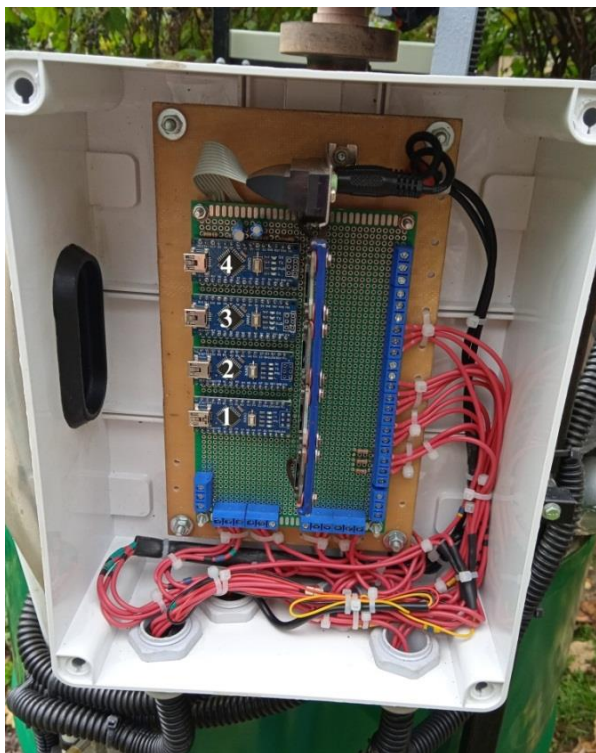


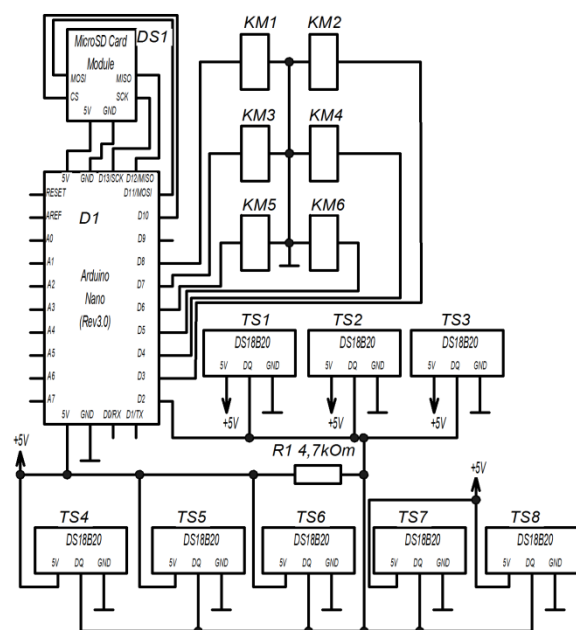
Рис. 3.16. Зовнішній вигляд створеної системи безперервного контролю та реєстрації інформації [13].

З метою розробки та створення системи безперервного контролю та реєстрації інформації зі збереженням на карти пам'яті, було використано чотири мікроконтролери Arduino Nano V3 ATmega328P-AU до кожного з яких власноруч за допомогою програмної мови Arduino IDE, розроблено алгоритми та підключено власну групу вимірювального обладнання [13].

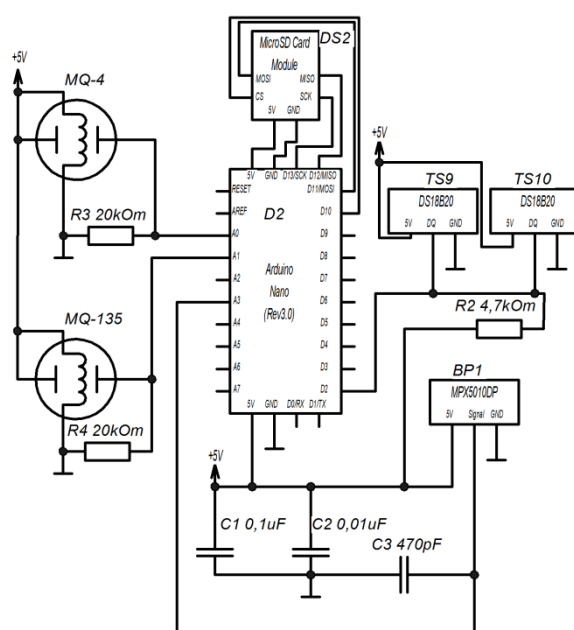
Схеми підключення вимірювально-реєструючого обладнання до мікроконтролерів наведено на рис. 3.17.

Мікроконтролер (2) (рис. 3.16) виконує функцію вимірювання та реєстрації об'єму біогазу, вмісту метану і вуглекислого газу. До аналогових та цифрових входів під'єднане наступне вимірювальне обладнання (рис. 3.17, б):

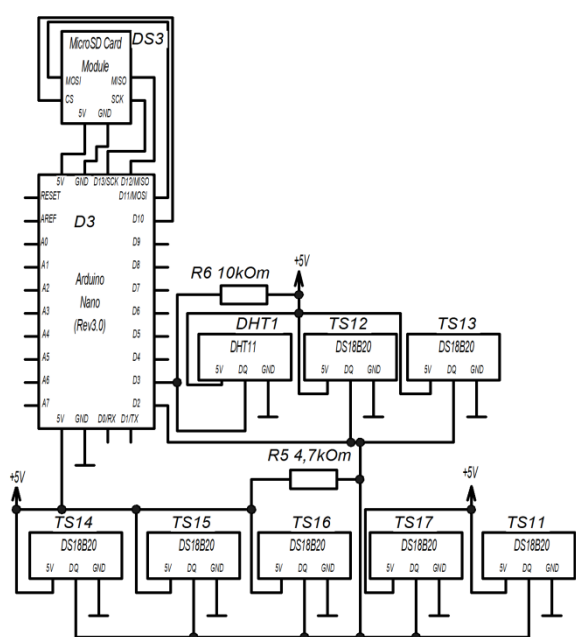
датчик вмісту метану MQ-4, вмісту вуглекислого газу MQ-135, датчик диференціального тиску MPX5010DP (BP1 рис. 3.17, б) та два вологозахищених датчики температури біогазу DS18B20 (TS9, TS10 рис. 3.17, б).



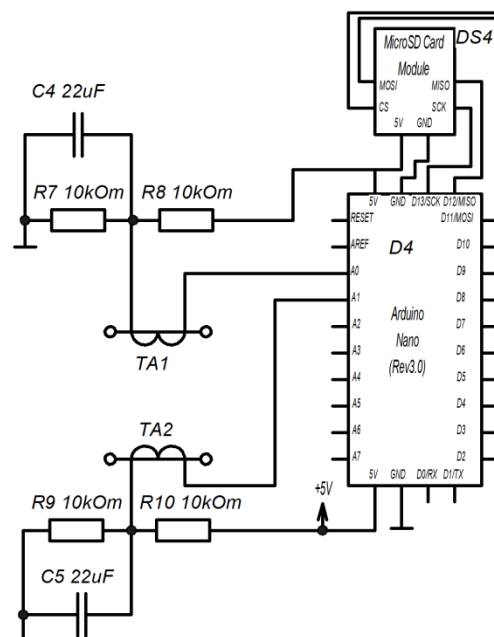
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.17. Схеми підключення вимірювально-реєструючого обладнання до:

а) мікроконтролера №1; б) мікроконтролера №2; в) мікроконтролера №3;

г) мікроконтролера №4;

Мікроконтролер (3) (рис. 3.16) виконує функцію вимірювання та реєстрації температури субстрату у об'ємі біогазового реактора, вологість та температуру навколишнього середовища, температуру стінки реактора. До цифрових входів під'єднане наступне вимірювальне обладнання (рис. 3.17, в): датчик вологості та температури навколишнього середовища DHT11, вологозахисний датчик температури змонтований на стінці реактора DS18B20 та шість вологозахисних датчиків температури субстрату у об'ємі біогазового реактора DS18B20 (TS11...TS17 рис. 3.17, в).

Мікроконтролер (4) (рис. 3.16) виконує функцію вимірювання і реєстрації споживаного електричними нагрівачами та електричним двигуном струму. До аналогових входів під'єднані два трансформатори струму SCT-013-030 (TA1, TA2 рис. 3.17, г).

На базі мікроконтролера (1) (рис. 3.16) побудовано систему автоматичного керування перемішуванням та підігрівом субстрату у біогазовому реакторі. До аналогових та цифрових входів мікроконтролера (1) рис. 3.16 під'єднані шість проміжних реле (KM1...KM6 рис. 3.17, а), вісім вологозахисних датчиків температури DS18B20 (TS1...TS8 рис. 3.17, а), три з яких вимірюють температуру субстрату у біогазовому реакторі та дають команду на ввімкнення-вимкнення системи підігріву, чотири датчики вимірюють температуру електричного нагрівального кабелю змонтованого у лопатях мішалки, один датчик вимірює температуру електричного нагрівального кабелю змонтованого на стінці реактора.

В основу розробленої системи автоматичного керування перемішуванням та підігрівом покладено наступні задачі [13]:

- керування процесом перемішування;
- керування процесом підігріву;
- виконує функцію двопозиційного регулятора підтримки температури електричного нагрівального кабелю у процесі підігріву субстрату;
- одночасно відбувається реєстрація даних з вимірювального обладнання на карти пам'яті (DS1...DS4, рис. 3.17).

Пристрій автоматичного керування одночасно виконує дві функції

управління перемішуванням, а саме: фіксоване управління, що виконується за часовою програмою та динамічне управління відповідно до показів датчиків температури та вмикання-вимикання системи підігріву [13].

Розроблена принципова схема керування однофазним асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором наведена на рис. 3.18.

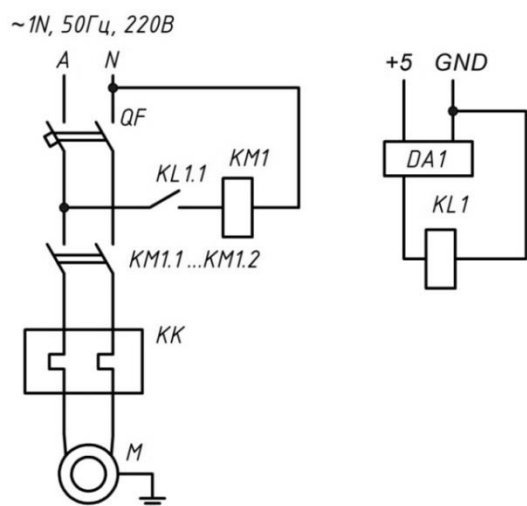


Рис. 3.18. Електрична схема керування однофазним асинхронним електродвигуном

В електричну схему керування однофазним асинхронним електричним двигуном входять наступні елементи: М – електродвигун; KM1 – електромагнітний пускач LC1 D0910; QF – автоматичний вимикач серії ВА-47-29; KK – струмове електротеплове реле серії РТЛ-1006УХЛ4; KL1 – проміжне реле; DA1 – електро-обчислювальний мікроконтролер Arduino Nano V3 ATmega328P-AU.

Підчас розробки алгоритму автоматичного керування приймалося до уваги необхідна кількість циклів перемішування на добу для забезпечення якісного зброджування органічного субстрату. Перемішування субстрату відбувається за допомогою лопатевої мішалки з електродвигуном-редуктором не менше 4 разів на добу, кожен з яких триває 20 хвилин.

У даній дисертаційній роботі розглядається електротепломеханічна система перемішування та підігріву, тому з метою рівномірного розподілення температурних полів по об'єму субстрату та уникнення досягнення критичних температур на ділянках близьких до поверхонь нагрівачів, одночасно з вмиканням системи підігріву, вмикається перемішування. При цьому, відбувається обнуління таймеру часу для вмикання наступного циклу перемішування. Після вимикання підігріву, електротепломеханічна система має накопичену залишкову температуру, тому відповідно до досліджень проведених у (Розділі 2, пункт 2.4.2),

з метою розподілу температури у ході охолодження електротепломеханічної системи, перемішування вимикається разом із системою підігріву.

Підігрів субстрату у реакторі виконується електричним нагрівальним кабелем розміщеним у лопатях електротепломеханічної системи, нагрівальний кабель з'єднаний секціями, тобто, кожна лопать є окремим нагрівальним елементом із власним автоматичним керуванням. Кожна лопать має власний вбудований датчик температури, котрий направлений на виконання функції, а саме: регулювання температури нагрівального кабелю у відповідній лопаті з метою недопущення перевищення температури останнього більше 60 °C [13].

Електрична схема керування секціями електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки та на стінці реактора наведена на рис. 3.19.

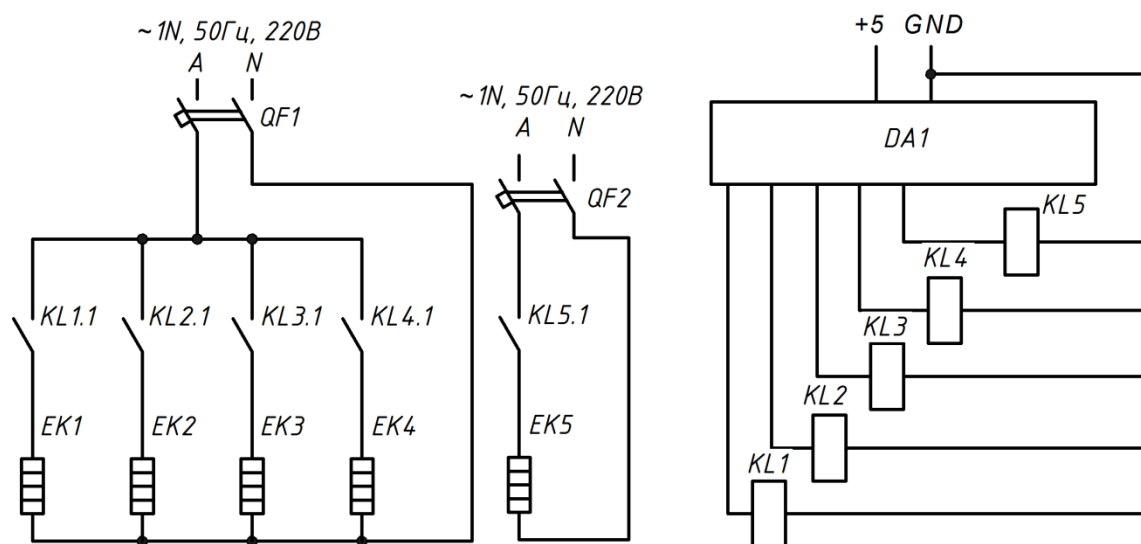


Рис. 3.19. Електрична схема керування електричним нагрівальним кабелем змонтованим у лопатях мішалки та на стінці реактора

В електричну схему керування електричним нагрівальним кабелем змонтованим у лопатях мішалки входять наступні елементи: QF1, QF2 – автоматичний вимикач; KL1...KL4 – проміжні реле включення 1...4 секцій нагріву; DA1 – електро-обчислювальний мікроконтролер Arduino Nano V3 ATmega328P-AU; EK1...EK4 – електричні нагрівачі 1...4 секцій електротепломеханічної системи, EK5 – нагрівальний елемент встановлений на

стінці біогазового реактора. KL5 – проміжне реле включення нагрівача на стінці реактора. Керування нагрівальними елементами відбувається відповідно до даних датчиків температури субстрату.

У розробленому алгоритмі керування, прописано управління секціями підігріву у різноманітному поєднанні, у відповідності до отриманих даних із датчиків температури. Використання такої системи керування підігрівачами дозволяє створити рівномірність нагріву всього об'єму субстрату при зменшенні споживання енергії у результаті вмикання нагрівачів на різну потужність [13]. Проміжні реле та автоматичні вимикачі зібрані в окремому монтажному блоці з метою унеможливлення створення похибки змінного струму та впливу перешкод під час активацій реле на покази вимірювального обладнання. Монтажний блок проміжних реле наведено на рис. 3.20.

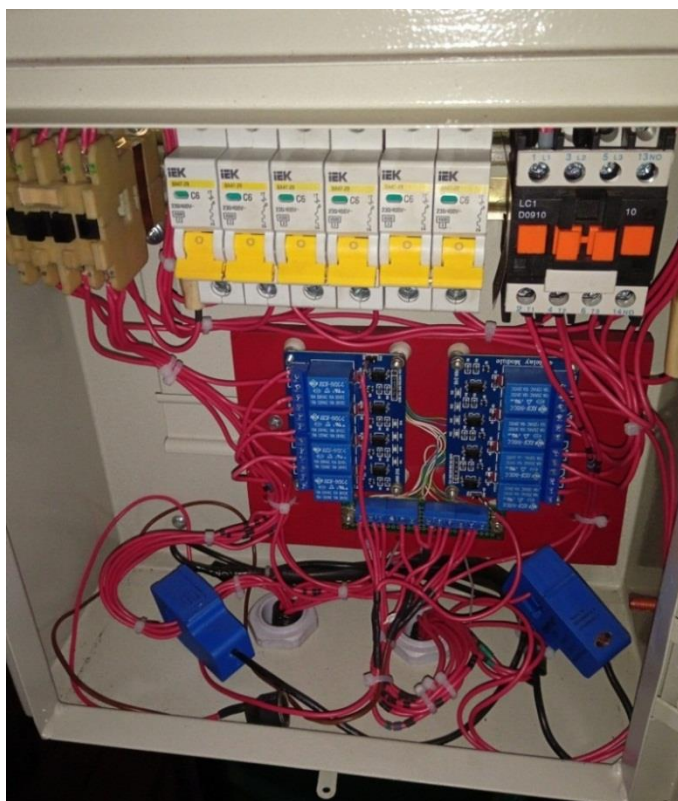


Рис. 3.20. Монтажний блок проміжних реле для керування секціями підігріву та електричним двигуном перемішуючого пристрою

Реєстрація даних з вимірювального обладнання відбувається через чотири модулі microSD на чотири карти пам'яті microSD 16 ГБ, на кожен мікроконтролер встановлено власну карту пам'яті.

З використанням під час експериментальних досліджень розробленої системи автоматичного контролю та реєстрації отримано масиви даних, кількість виміряних значень з усіх датчиків складає 18000000 значень за два етапи експериментальних досліджень.

У подальшому, зібрані масиви експериментальних даних було оброблено у прикладній програмі Wolfram Mathematica.

3.6. Планування експериментальних досліджень на фізичній моделі біогазового реактора з класичною та раціональною системою підігріву

Під час експериментальних досліджень планується провести порівняльний аналіз енергетичного споживання двох систем підтримки постійної температури при анаеробному бродінні, «класичної» – прокладений на зовнішній поверхні стінки біогазового реактора електричний нагрівальний кабель [16-18] (рис. 3.21) та раціональної – електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву субстрату.



Рис. 3.21. Електричний нагрівальний кабель прокладений на зовнішній стінці біогазового реактора

У роботі біогазового реактора виділяють три основні етапи: процес початкового нагріву субстрату до температури бродіння; охолодження субстрату до температури ввімкнення підігріву; підтримка стабільної температури бродіння. Тому, стверджувати про енергоефективність системи інтенсифікації біогазового виробництва можливо тільки на основі результатів проведених теоретичних та практичних досліджень витрати енергії на кожен із стадій [16-18].

Експериментальні дослідження енергетичної ефективності використання підігріву були проведенні в два етапи. Кожен з етапів тривав 168 годин. На кожному з етапів було отримано масиви даних, кількість вимірних значень з 23 датчиків котрі використовувалися у експериментальних дослідженнях складає 9000000 значень.

На першому етапі проводились дослідження теплового розподілу та енергетичної ефективності при використанні «класичного» підігріву виконаного

гнучким електричним кабелем розміщеним на зовнішній поверхні стінки фізичної моделі біогазового реактора. На другому етапі проводились дослідження теплового розподілу та енергетичного споживання при використанні електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву. Керування електродвигуном приводу валу змішувача та секціями підігріву виконувалось автоматично, згідно з розробленим алгоритмом керування [13].

На кожному з етапів проводилось дослідження, енергетичного споживання системами підігріву та перемішування, зміни температури субстрату, стінок реактора, нагрівального кабелю, теплових втрат у навколишнє середовище, вихід біогазу та кількості вмісту в ньому метану та вуглекислого газу.

При експериментальних дослідженнях на виготовленій фізичній моделі біогазового реактора з електротепломеханічною системою, для обох етапів у якості субстрату використовувалися попередньо подрібненні картопляні залишки (рис. 3.22) масою 10 кг, розбавлені чистою водою у об'ємі 30 літрів [16-18]. Загальний об'єм завантаження біогазового реактора для кожного етапу експериментальних досліджень складає 0,04 м³.



Рис. 3.22. Подрібненні картопляні залишки використані у якості субстрату при експериментальних дослідженнях

Реактор завантажувався на 2/3 субстратом, а саме дослідження, проводилося за періодичної дії, тобто завантаження свіжого субстрату та вивантаження відпрацьованої шламів відсутнє. Експериментальні дослідження проводилися наступним чином: підготовлений субстрат завантажувався у біогазовий реактор та залишався там на 12 годин, з метою

забезпечення врівноваження температури усіх об'єктів котрі контактують із субстратом [16-18]. Після чого, подавалося живлення на експериментальну

установку, вмикалася система автоматичного керування та реєстрації даних та проводилися експериментальні дослідження енергетичних витрат на процеси нагріву та перемішування [16-18].

Зброджування субстрату відбувається у мезофільному температурному режимі при температурі $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, з допустимим відхиленням $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вмикання підігріву відбувається при досягненні температури субстрату $+34\text{ }^{\circ}\text{C}$ [16-18].

Оскільки температура системи електричного підігріву перевищує температуру анаеробного зброджування, а внаслідок закону термодинамічної рівноваги температура тіл врівноважується, тому з метою уникнення перевищення максимально допустимої температури мезофільного температурного режиму використаного при експериментальних дослідженнях, вимикання системи підігріву відбувається при досягненні субстратом температури $+35,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Висновки до третього розділу

1. 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 за використання електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки, а також порівняння їх з результатами, отриманими теоретичним шляхом та обрано методику обробки масиву зібраних експериментальних даних.

2. Спроековано 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.

3. Спроековано та виготовлено рухомі контакти для живлення електричного нагрівального кабелю та датчиків температури розміщених у лопатях мішалки.

4. Синтезовано та виготовлено систему автоматичної реєстрації показань та керування електротепломеханічною системою для перемішування та підігріву субстрату.

5. Підібрано та змонтовано для збору експериментальних даних високоточне вимірювальне обладнання, яке дає можливість здійснити безперервний збір даних про зміну температури електричного нагрівального кабелю, лопатей мішалки, стінки біогазового реактора, субстрату, біогазу, температури та вологості навколишнього середовища, струму споживання електричним двигуном та електричним нагрівальним кабелем.

6. Спроектовано та виготовлено пристрій для вимірювання утвореного під час експериментальних досліджень об'єму біогазу та визначення у ньому вмісту вуглекислого газу та метану.

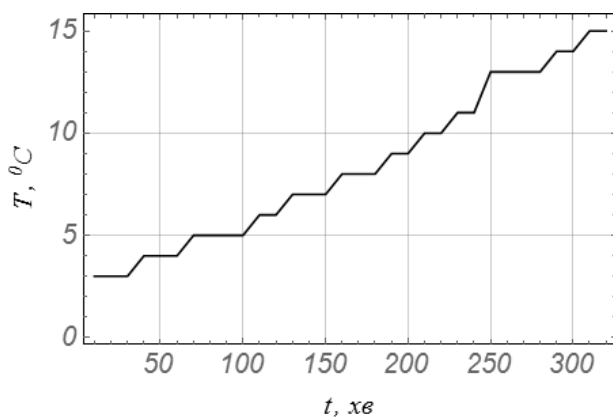
РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

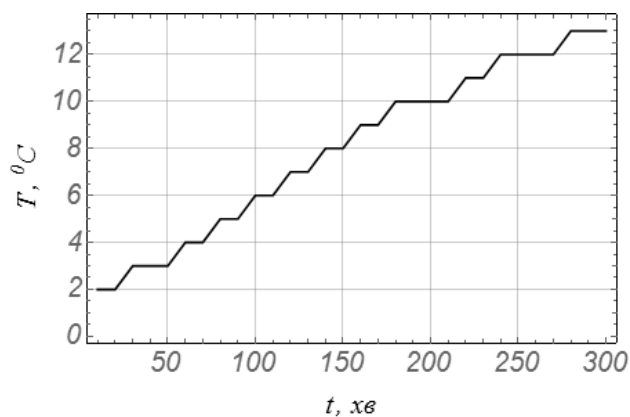
4.1. Процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування

Біогазовий реактор являє собою ємність у якій відбувається зброджування органічного субстрату з метою отримання біогазу та екологічно чистих добрив.

Початковий період роботи біогазового реактора характеризується великим споживанням енергії на процес перемішування та підігріву субстрату. Тому що, завантажений органічний субстрат у біогазовий реактор має початкову температуру нижчу за температуру анаеробного процесу бродіння використаного в експериментальних дослідженнях (мезофільний температурний режим). Проведено експериментальні дослідження витрати енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування за використання «класичної» системи електричного підігріву – при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці реактора та «раціональної» – розміщення електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки [16, 17].



а)



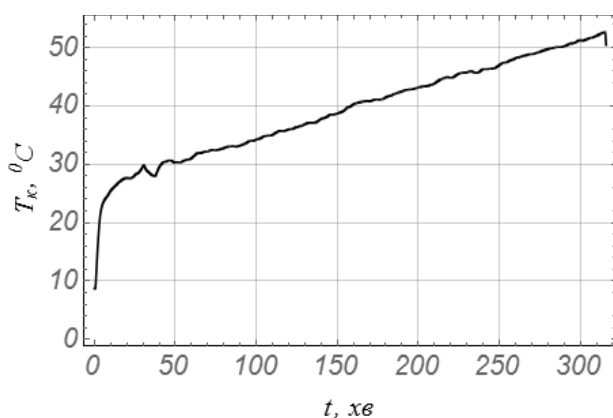
б)

Рис. 4.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки

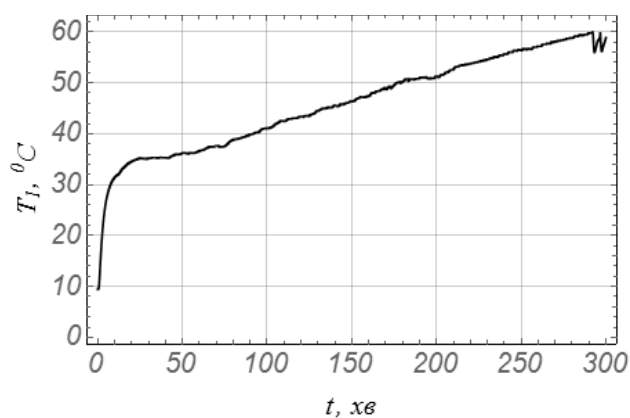
Підчас початкового нагріву субстрату до температури зброджування при

розміщені електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактора середнє значення температури навколишнього середовища становить $T = 8,37\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Додаток Д.1, рис. Д.1.1 момент часу $\Delta t = 0...316\text{ хв}$) та (рис. 4.1 а) середнє значення вологості повітря навколишнього середовища $\varphi = 64,4\%$, (Додаток Д.1, рис. Д.1.2 момент часу $\Delta t = 0...316\text{ хв}$). При розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки, середнє значення температури навколишнього середовища становить $T = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$, (Додаток Д.2, рис. Д.2.1 момент часу $\Delta t = 0...300\text{ хв}$) та (рис. 4.1 б) середнє значення вологості повітря $\varphi = 70,2\%$, (Додаток Д.2, рис. Д.2.2 момент часу $\Delta t = 0...300\text{ хв}$).

Порівнюючи між собою обидві системи підігріву помітно, що на момент експериментальних досліджень системи при використанні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактора середнє значення температури навколишнього середовища становить більше на 4,4% ніж, при експериментальних дослідженнях при використанні електричного нагрівального кабелю вмонтованих у лопаті двоярусної лопатевої мішалки [16, 17].



а)



б)

Рис. 4.2. Графік зміни температури електричного нагрівального кабелю:
а) при розміщенні на стінці біогазового реактора; б) при розміщенні у лопатях мішалки

Аналізуючи графік зміни температури електричного нагрівального кабелю розміщеного на стінці реактора (Додаток Д.1, рис. Д.1.3, момент часу $\Delta t = 0 \dots 316$ хв) та (рис. 4.2 а) помітно, що за перші 6 хвилин роботи підігріву відбувається стрімке зростання температури від значення $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $23,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, це відбувається внаслідок відсутності встановленого потоку субстрату у біогазовому реакторі та накопичення електричним нагрівальним кабелем теплової енергії, оскільки питома теплоємність кабелю менша за питому теплоємність матеріалів реактора та субстрату. Після чого, відбувається плавний підйом температури нагрівального кабелю, значення якої у момент часу $\Delta t = 316$ хв, складає $T_k = 52,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ [16].

Середнє значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного на стінці реактора становить $39,24\text{ }^{\circ}\text{C}$.

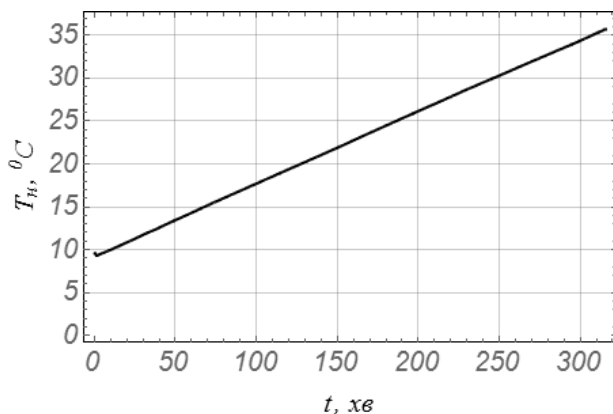
З графічних залежностей зміни температури електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях мішалки (Додаток Д.2, рис. Д.2.3, рис. Д.2.4, рис. Д.2.5, рис. Д.2.6 момент часу $\Delta t = 0 \dots 300$ хв) та (рис. 4.2 б) помітно, що у перші 10 хвилин роботи підігріву відбувається стрімке зростання температури від значення $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $31,26\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На проміжку часу $\Delta t = 25 \dots 41$ хв (рис. 4.2 б), спостерігається рівномірна температура нагрівального кабелю, значення якої становить $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, після 41 хвилини відбувається плавне зростання температури до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. У момент часу $\Delta t = 291$ хв, спрацьовує терморегулятор і вимикає підігрівальну секцію. У момент часу $\Delta t = 293,5$ хв, температура нагрівального кабелю складає $56\text{ }^{\circ}\text{C}$, напруга живлення подається на секцію нагріву і температура кабелю починає зростати (рис. 4.2 б) [17].

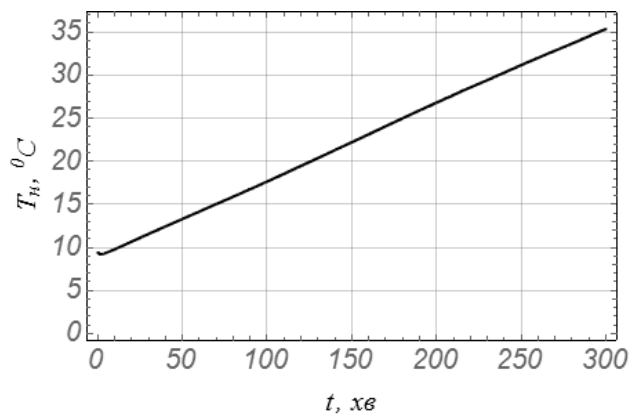
Середнє значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях мішалки становить $46,04\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Порівнюючи між собою обидві системи підігріву, можна відмітити, що

середнє значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях двоярусної лопатевої мішалки на 15% більше, а максимальне значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях мішалки на 12% більше [16, 17].

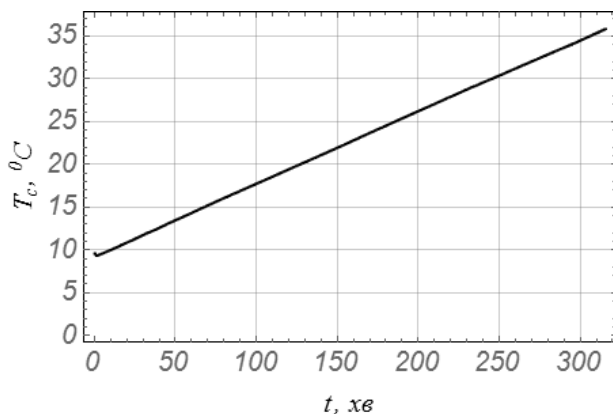


а)

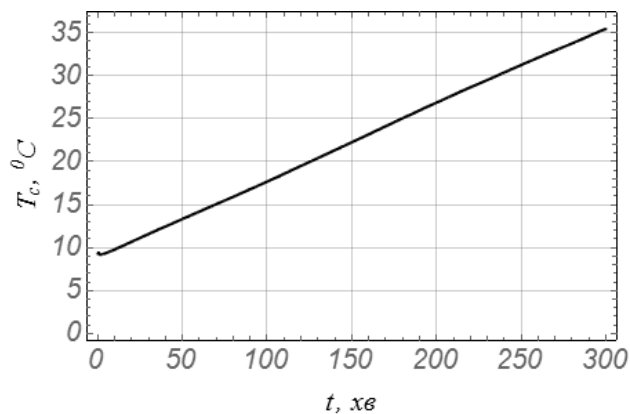


б)

Рис. 4.3. Графік зміни температури субстрату у нижній частині реактора при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки

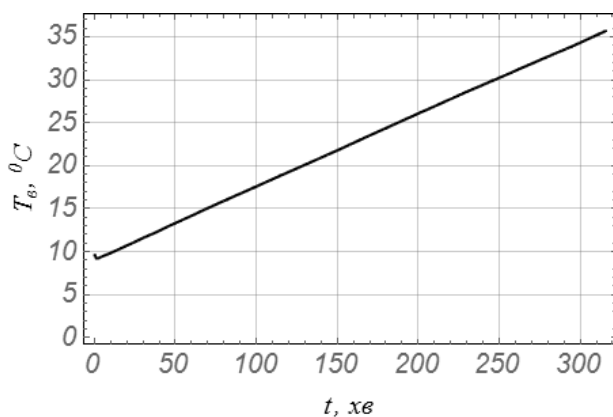


а)

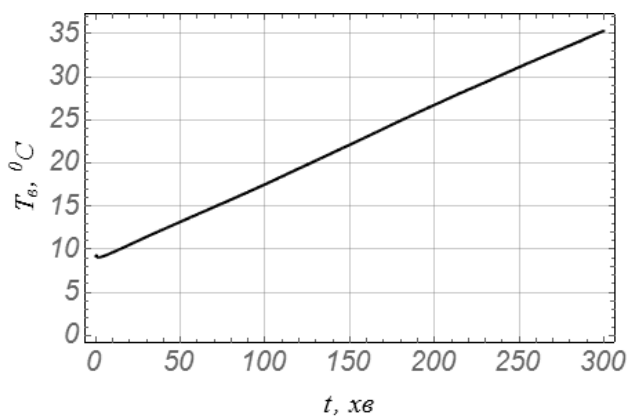


б)

Рис. 4.4. Графік зміни температури субстрату у середній частині реактора при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки



а)

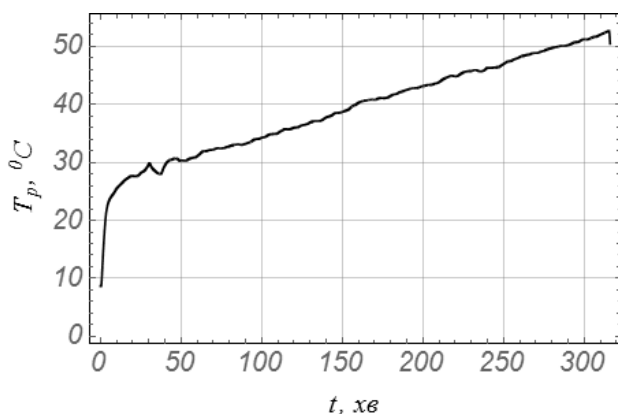


б)

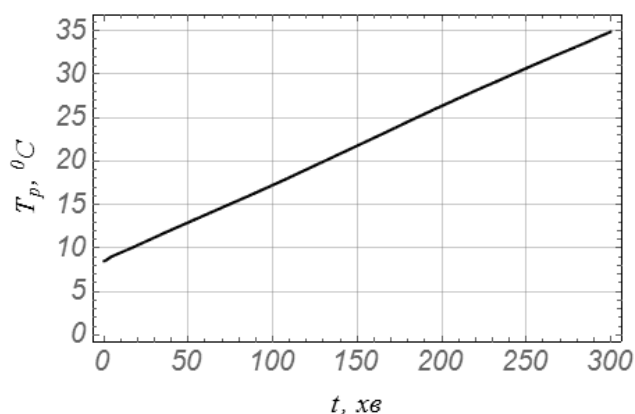
Рис. 4.5. Графік зміни температури субстрату у верхній частині реактора при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки

При розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактора з графічних залежностей зміни температури субстрату у нижній частині реактора (Додаток Д.1, рис. Д.1.8 момент часу $\Delta t = 0...316$ хв) та (рис. 4.3 а), середній (Додаток Д.1, рис. Д.1.9 момент часу $\Delta t = 0...316$ хв) та (рис. 4.4 а), верхній (Додаток Д.1, рис. Д.1.10 момент часу $\Delta t = 0...316$ хв) та (рис. 4.5 а) видно, що початкова температура субстрату по всьому об'єму реактора становить $9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. У початковий момент перемішування та підігріву спостерігається певне спадання температури субстрату, це пояснюється процесом термодинамічної рівноваги, котрий виникає у ході встановлення примусового теплообміну у біогазовому реакторі. Подальше зростання температури субстрату відбувається за лінійною залежністю у момент вимикання системи підігріву субстрату ($\Delta t = 316$ хв) температура нижньої частини субстрату становить $35,69\text{ }^{\circ}\text{C}$, середньої $35,81\text{ }^{\circ}\text{C}$, верхньої $35,69\text{ }^{\circ}\text{C}$. Середнє значення температури субстрату $35,73\text{ }^{\circ}\text{C}$. При розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної механічної мішалки з графічних залежностей зміни температури субстрату у нижній частині реактора (Додаток Д.2, рис. Д.2.8 момент часу

$\Delta t = 0 \dots 300$ хв) та (рис. 4.3 б), середній (Додаток Д.2, рис. Д.2.9 момент часу $\Delta t = 0 \dots 300$ хв) та (рис. 4.4 б), верхній (Додаток Д.2, рис. Д.2.10 момент часу $\Delta t = 0 \dots 300$ хв) та (рис. 4.5 б), видно, що початкова температура субстрату по всьому об'єму реактора становить $9,3^\circ\text{C}$. У початковий момент перемішування та підігріву субстрату спостерігається певне спадання температури субстрату, як і у попередньому випадку, це пояснюється процесом термодинамічної рівноваги. Подальше зростання температури субстрату відбувається за лінійною залежністю у момент вимикання системи підігріву субстрату ($\Delta t = 300$ хв) температура нижньої частини субстрату становить $35,73^\circ\text{C}$, середньої $35,82^\circ\text{C}$, верхньої $35,73^\circ\text{C}$. Середнє значення температури субстрату $35,76^\circ\text{C}$. При порівнянні між собою обох систем підігріву видно, що початкова температура субстрату при використанні підігріву розташованого на стінці реактора на 2% більша, при цьому, час початкового нагріву субстрату до температури зброджування при використанні електричних підігрівачів вмонтованих у лопаті механічної двоярусної мішалки на 5% менший [16, 17].



а)



б)

Рис. 4.6. Графік зміни температури стінки біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки

Із графіку зміни температури стінки реактора при розміщенні нагрівального кабелю на стінці реактора (рис. 4.6 а) видно, що зміна температури стінки схожа

до графічної залежності зміни температури нагрівального кабелю (рис. 4.2 а). Із графіку (Додаток Д.2, рис. Д.2.7 момент часу $\Delta t = 0...300$ хв) та (рис. 4.6 б) помітно, що температура стінки змінюється за такою ж залежністю, як і температура субстрату (рис. 4.3 б), однак, маючи менше значення температури на $0,7$ °C [16, 17].

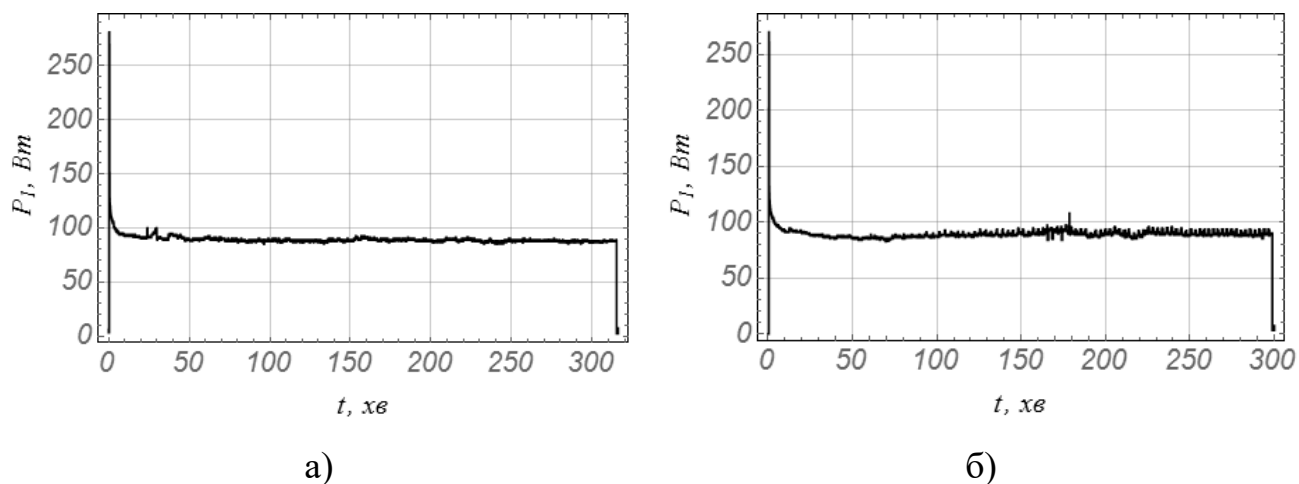


Рис. 4.7. Графік затраченої потужності електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки

Аналізуючи графіки затраченої потужності електричним двигуном (Додаток Д.1, рис. Д.1.11 момент часу $\Delta t = 0...316$ хв) та (рис. 4.7 а), помітно, що в початковий момент руху, виникає миттєве зростання потужності до значення ($P_1 = 280$ Вт), викликане рушійним моментом, з подальшим виходом на номінальну потужність, середнє значення якої становить ($P_1 = 90$ Вт). Тривалість підігріву субстрату до температури $35,8$ °C, при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці реактора складає 316 хв. Електричний двигун перемішуючого пристрою при використанні підігріву розміщеного на стінці реактора витрачає $W_1 = 1,69 \cdot 10^6$ Дж, на процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування [16].

З графічних залежностей (Додаток Д.2, рис. Д. 2.11 момент часу

$\Delta t = 0...300$ хв) та (рис. 4.7 б), помітно, що за використання електротепломеханічної системи при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки, у початковий момент руху внаслідок подолання лопатями опору, що створює субстрат виникає миттєве зростання потужності до значення ($P_1 = 270$ Вт). В подальшому відбувається вихід на номінальну потужність, середнє значення якої $P_1 = 90$ Вт. Електричний двигун перемішуючого пристрою при використанні підігріву розміщеного у лопатях двоярусної лопатевої мішалки витрачає $W_1 = 1,60 \cdot 10^6$ Дж, на процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування [17].

Порівнюючи між собою обидві системи, можна стверджувати, що при використанні електричних нагрівачів розміщених у лопатях двоярусної лопатевої механічної мішалки, електричний двигун перемішуючого пристрою витрачає у 5,3% менше енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування, при цьому, тривалість підігріву до температури $35,8^\circ\text{C}$, при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки складає 300 хв, що на 16 хвилин менше у порівнянні з системою підігріву на стінці реактора.

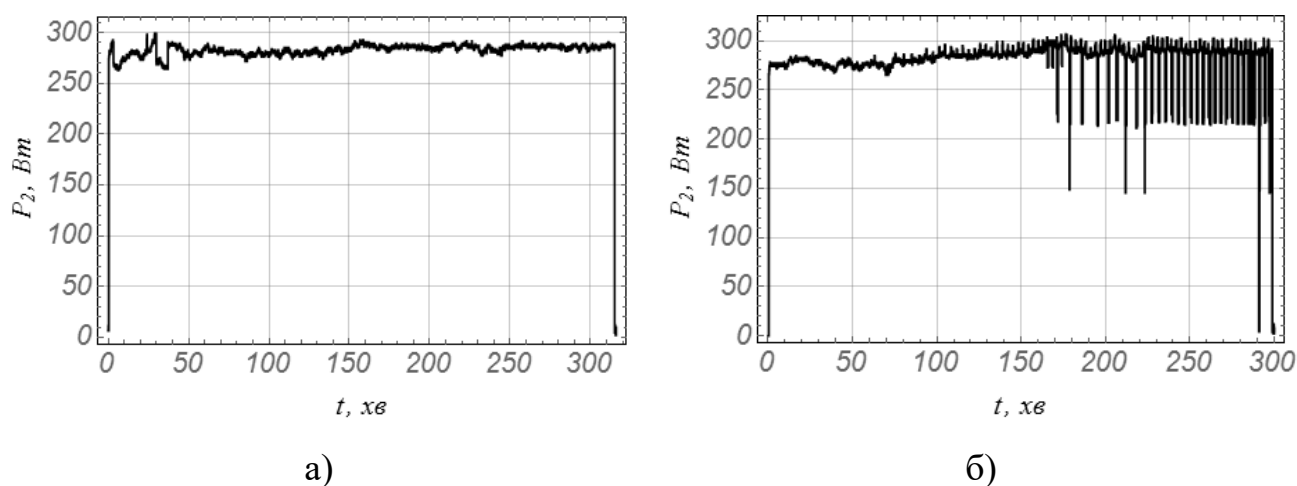


Рис. 4.8. Графік затраченої потужності електричним нагрівальним кабелем:
а) при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактора; б) при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки

Аналізуючи графіки затраченої потужності електричним нагрівальним кабелем (Додаток Д.1, рис. Д.1.12 момент часу $\Delta t = 0...316$ хв) та (рис. 4.8 а), помітно, що при вмиканні нагрівачів відбувається стрибкоподібне зростання потужності до значення ($P_2 = 293$ Вт) та знаходиться у межах цього значення упродовж усього періоду нагріву. Система підігріву виконана із електричного нагрівального кабелю розміщеного на стінці біогазового реактора витрачає $W_2 = 5,34 \cdot 10^6$ Дж, на процес підігріву субстрату з $9,5$ °C до $35,8$ °C (рис. 4.3 а, рис. 4.4 а, рис. 4.5 а). Середнє значення споживаної потужності електричними нагрівачами складає $P_2 = 281,75$ Вт.

З графічних залежностей (Додаток Д.2, рис. Д.2.12 момент часу $\Delta t = 0...300$ хв) та (рис. 4.8 б), помітно, що за використання електротепломеханічної системи при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки, у момент вмикання нагрівальних секцій виникає стрибкоподібне зростання потужності до значення ($P_2 = 278$ Вт) у подальшому зростаючи до значення номінальної потужності ($P_2 = 293$ Вт). У момент часу ($\Delta t = 172$ хв) спостерігається зниження споживаної потужності електричними нагрівачами до значення ($P_2 = 219$ Вт), це зумовлено досягненням секції нагріву температури вимикання (Додаток Д.2, рис. Д.2.4 момент часу $\Delta t = 172$ хв). Схожа картина вмикання-вимикання секцій підігріву вмонтованих у лопаті двоярусної лопатевої мішалки спостерігається до повного вимикання системи підігріву субстрату. Система підігріву виконана із електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки витрачає $W_2 = 4,99 \cdot 10^6$ Дж, на процес підігріву субстрату у біогазовому реакторі з $9,3$ °C до $35,8$ °C (рис. 4.3 б, рис. 4.4 б, рис. 4.5 б). Середнє значення споживаної потужності електричними нагрівачами складає $P_2 = 277,4$ Вт [16, 17].

Порівнюючи між собою обидві системи, помітно, що при використанні електричних нагрівачів розміщених у лопатях двоярусної лопатевої механічної

мішалки, система підігріву витрачає на 6,6% менше енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування, при цьому, середнє значення споживаної потужності зменшилось на 1,5% [16, 17].

4.2. Тривалість теплових втрат у навколишнє середовище для одного циклу охолодження субстрату

Підчас анаеробного бродіння біогазовий реактор розташований у кліматичній зоні навколишнього середовища, згідно із законом теплової рівноваги, коли два середовища з різною температурою контактують, між ними відбувається тепловіддача, внаслідок чого їх температура вирівнюється.

Тривалість фази охолодження субстрату до температури вмикання підігріву відіграє одну з головних ролей у зниженні енерговитрат на інтенсифікацію біогазового виробництва, оскільки на загальну кількість витраченої енергії для підтримки температурного режиму субстрату впливає тривалість охолодження останнього. Тому, визначення втрат енергії в навколишнє середовище при мезофільному режимі бродіння є актуальним питанням [18].

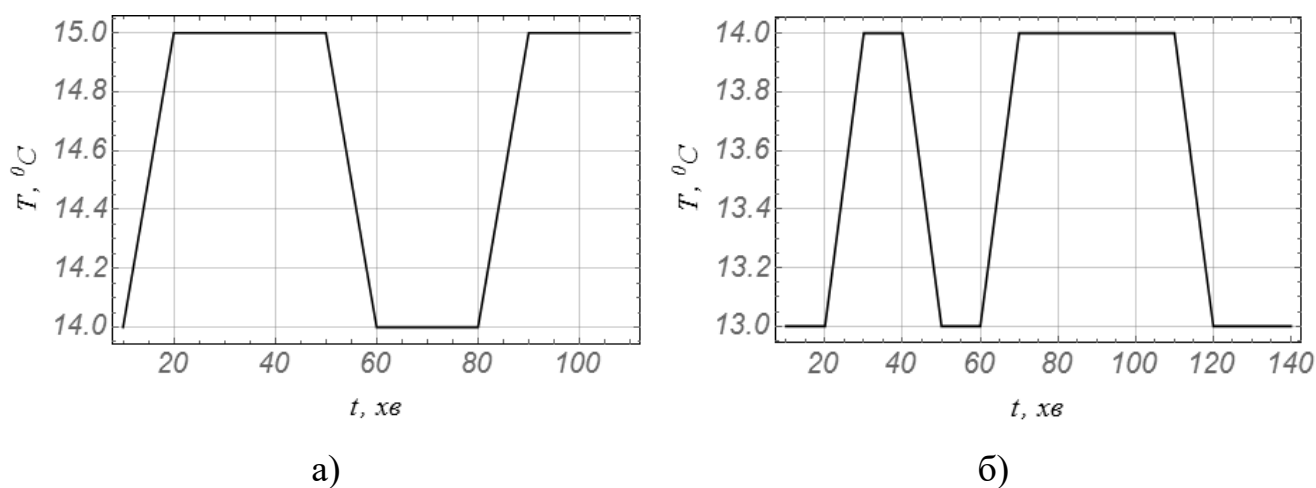


Рис. 4.9. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки

Під час охолодження субстрату у біогазовому реакторі при розміщенні електричного нагрівача на стінці реактора середнє значення температури навколишнього середовища становить $T = 14,63^{\circ}\text{C}$, (Додаток Д.1, рис. Д.1.1 момент часу $\Delta t = 316...420 \text{ хв}$) та (рис. 4.9 а) середнє значення вологості повітря $\varphi = 58,09 \%$, (Додаток Д.1, рис. Д.1.2 момент часу $\Delta t = 316...420 \text{ хв}$). При розміщенні електричного нагрівача у лопатях мішалки, середнє значення температури навколишнього середовища становить $T = 13,5^{\circ}\text{C}$, (Додаток Д.2, рис. Д.2.1 момент часу $\Delta t = 300...439 \text{ хв}$) та (рис. 4.9 б) середнє значення вологості повітря $\varphi = 60,14 \%$, (Додаток Д.2, рис. Д.2.2 момент часу $\Delta t = 300...439 \text{ хв}$).

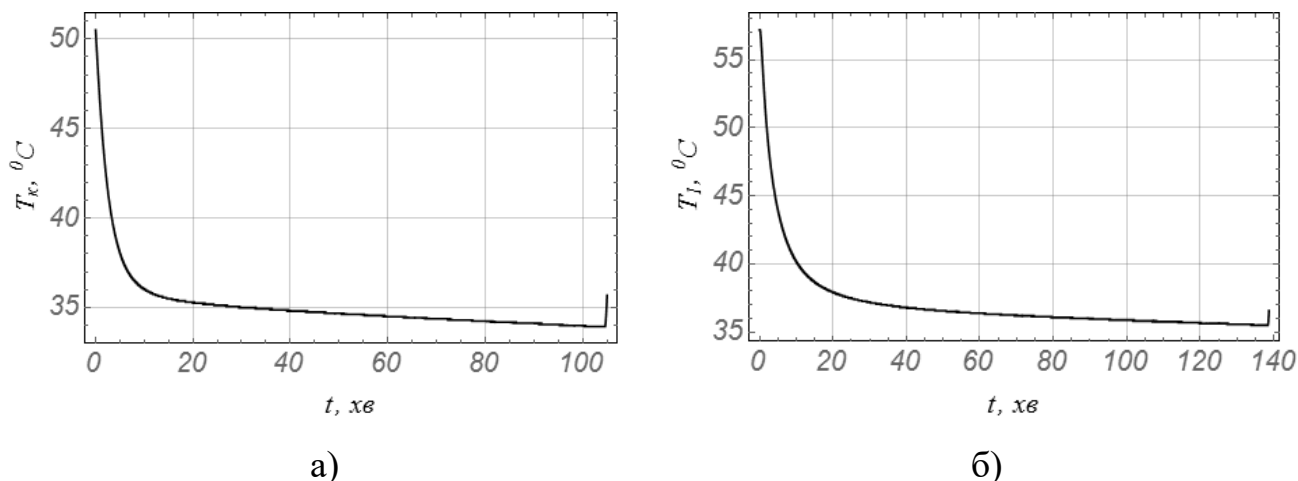


Рис. 4.10. Графік зміни температури електричного нагрівального кабелю:
а) при розміщенні на стінці біогазового реактора; б) при розміщенні у лопатях мішалки

Аналізуючи графік зміни температури електричного нагрівального кабелю розміщеного на стінці реактора (Додаток Д.1, рис. Д.1.3 момент часу $\Delta t = 316...420 \text{ хв}$) та (рис. 4.10 а) помітно, що у перші 8 хвилин охолодження відбувається стрімке зниження температури кабелю до значення $36,5^{\circ}\text{C}$, це пояснюється законом термодинамічної рівноваги. Подальше зниження температури має більш плавний характер, та на момент ввімкнення підігріву

$\Delta t = 104$ хв, (рис. 4.10 а) температура кабелю набуває значення $33,91$ °C. Середня температура кабелю в процесі охолодження складає $35,1$ °C [18].

З графічних залежностей зміни температури електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях мішалки (Додаток Д.2, рис. Д.2.3...Д.2.6, момент часу $\Delta t = 300..439$ хв) та (рис. 4.10 б) видно, що у перші 10 хвилин охолодження відбувається стрімке зниження температури кабелю розташованого у лопатях мішалки до значення 40 °C. Охолодження кабелю до температури $36,5$ °C відбувається протягом 53,7 хвилини з моменту початку охолодження системи. Подальше зниження температури має плавний характер, а процес охолодження триває 139 хвилин. На момент ввімкнення системи підігріву субстрату, температура кабелю складає $35,5$ °C. Середня температура кабелю в процесі охолодження складає $37,1$ °C [18].

Порівнюючи між собою обидві системи, можна стверджувати, що тривалість охолодження при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки на 25,2% більше, а середнє значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях мішалки на 5,4% більше, при цьому мінімальне значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях мішалки на 4,5% більше. Охолодження кабелю до температури $36,5$ °C при використанні системи з нагрівальним кабелем розміщеним у лопатях мішалки відбувається на 85,1% повільніше [18].

Тривалий процес охолодження зображений на (рис. 4.10 б) пояснюється умовами теплопередачі. Оскільки, електротепломеханічна система для перемішування та підігріву субстрату знаходиться у центральній частині біогазового реактора, тому, теплота від нагрівальної системи повинна пройти через кілька прошарків із власними термічними опорами, а саме: шар субстрату, стінка біогазового реактора, шар утеплювального матеріалу, захисний кожух. А в наслідок відсутності примусової конвекції у період охолодження субстрату, коефіцієнт теплопередачі менший, що дозволяє досягти тривалішого періоду

охолодження електротепломеханічної системи. При класичній системі підігріву, теплота від електричного нагрівального кабелю розташованого на стінці реактора, розподіляється на два температурні профілі, один з яких надходить до стінки реактора та субстрату, інший через утеплювальний шар та захисний кожух надходить до навколишнього середовища [18].

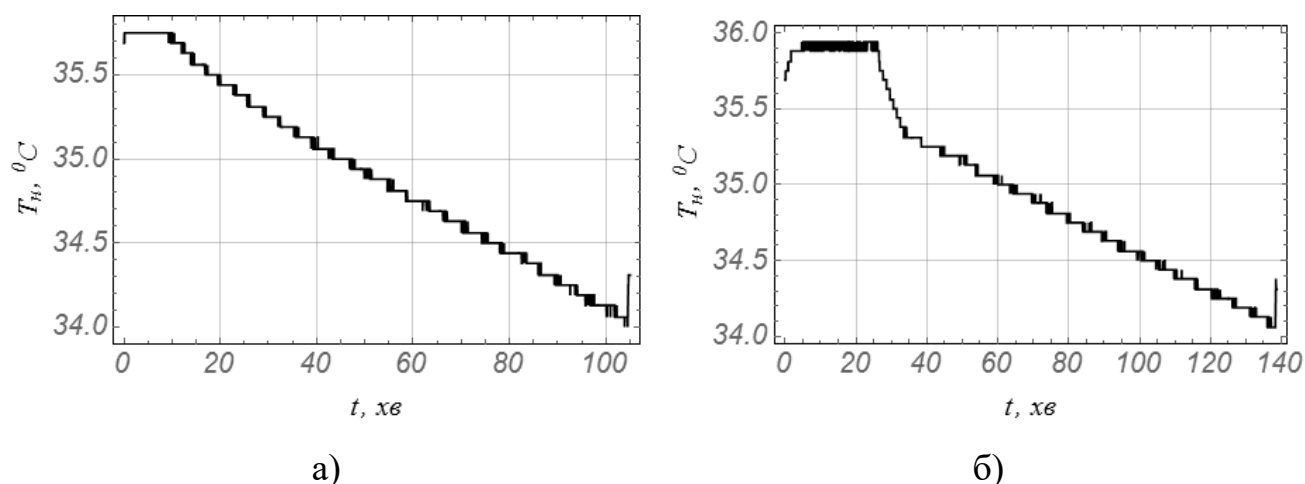


Рис. 4.11. Графік зміни температури субстрату у нижній частині реактора при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки

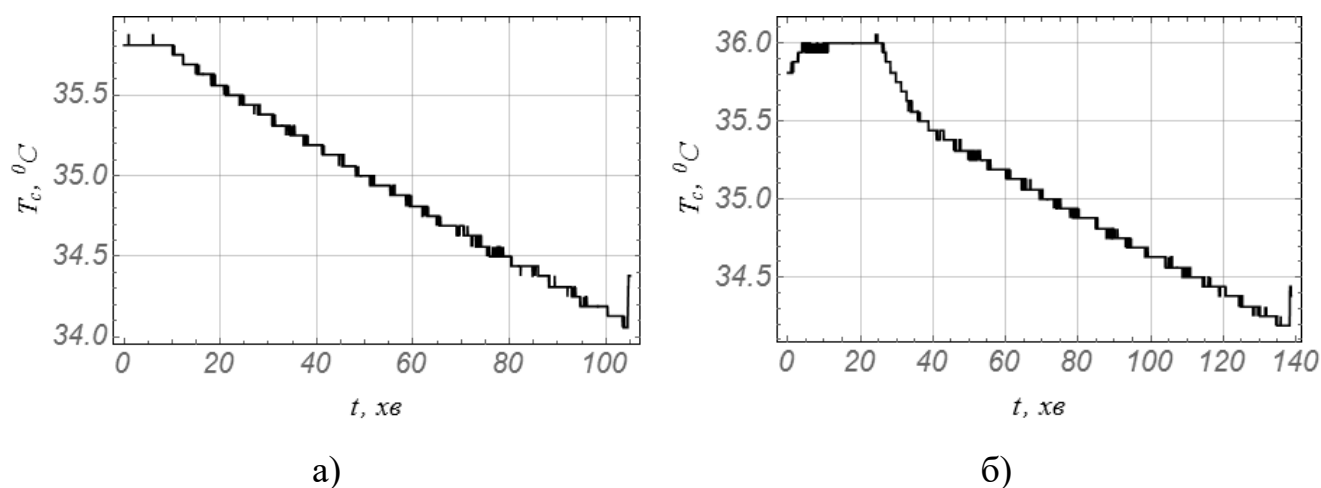


Рис. 4.12. Графік зміни температури субстрату у середній частині реактора при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки

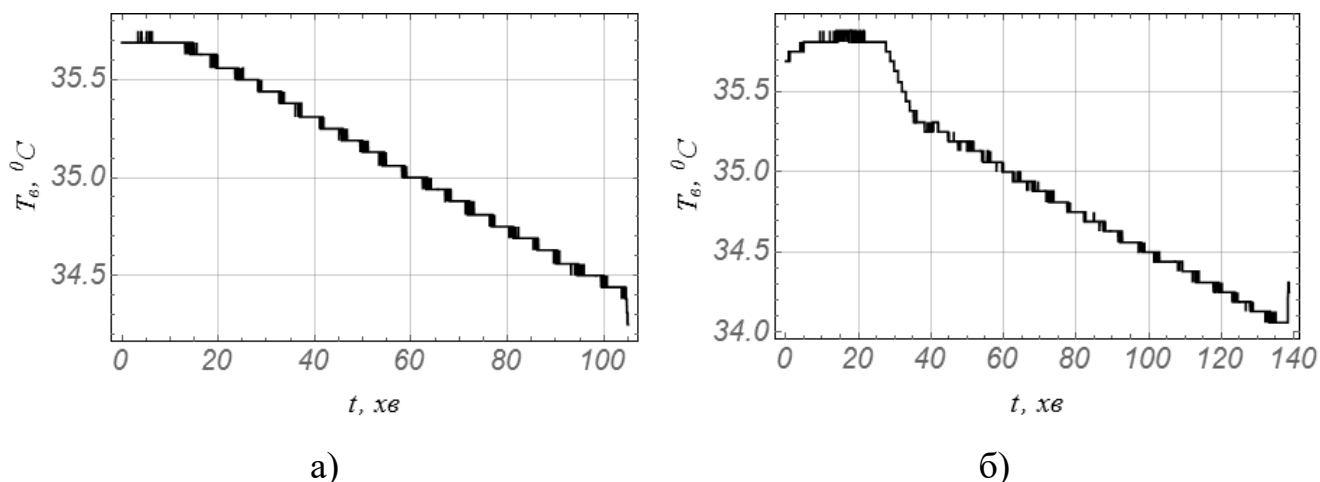


Рис. 4.13. Графік зміни температури субстрату у верхній частині реактора при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки

Аналізуючи графічні залежності зміни температури субстрату (рис. 4.11 а, рис. 4.12 а, рис. 4.13 а) видно, що після вимикання системи підігріву та початку охолодження температура субстрату залишається не змінною протягом 11 хвилин, в подальшому спадаючи до температури 34 °С. Середнє значення температури субстрату у верхньому шарі субстрату складає 34,95 °С, середньому 35,04 °С та у нижньому 35,1 °С. Середнє значення температури по об'єму субстрату становить 35,03 °С. Максимальне значення температури субстрату становить 35,88 °С.

Аналізуючи графічні залежності зміни температури субстрату (рис. 4.11 б, рис. 4.12 б, рис. 4.13 б) видно, що після вимикання системи підігріву температура субстрату зростає протягом 5,5 хвилин та набуває максимальних значень у верхньому прошарку субстрату 35,9 °С, середньому 36,0 °С, нижньому 35,95 °С котрі залишаються незмінними до 27 хвилини, у подальшому спадаючи до температури 34 °С. Середнє значення температури субстрату у верхньому шарі субстрату складає 35,1 °С, середньому 35 °С, нижньому 34,99 °С. Середнє значення температури по об'єму субстрату становить 35,03 °С [18].

Порівнюючи між собою обидві системи, можна стверджувати, що тривалість охолодження субстрату при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки на 25,2% більше, а максимальне значення температури

субстрату на $0,12^{\circ}\text{C}$ більше. При цьому, тривалість підтримки максимальної температури при розміщенні нагрівального кабелю у лопатях мішалки на 59,3% більше [18].

4.3. Експериментальне дослідження енергетичних витрат під час одного циклу термостабілізації субстрату

Враховуючи необхідність підтримки стабільної температури субстрату, було проведено експериментальне дослідження енергетичних витрат під час одного циклу термостабілізації субстрату з 34°C до $35,8^{\circ}\text{C}$, за використання двох систем електричного підігріву: «класичної» – при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактора та «раціональної» – при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки. Результати безперервних експериментальних досліджень наведено у (Додатку Д).

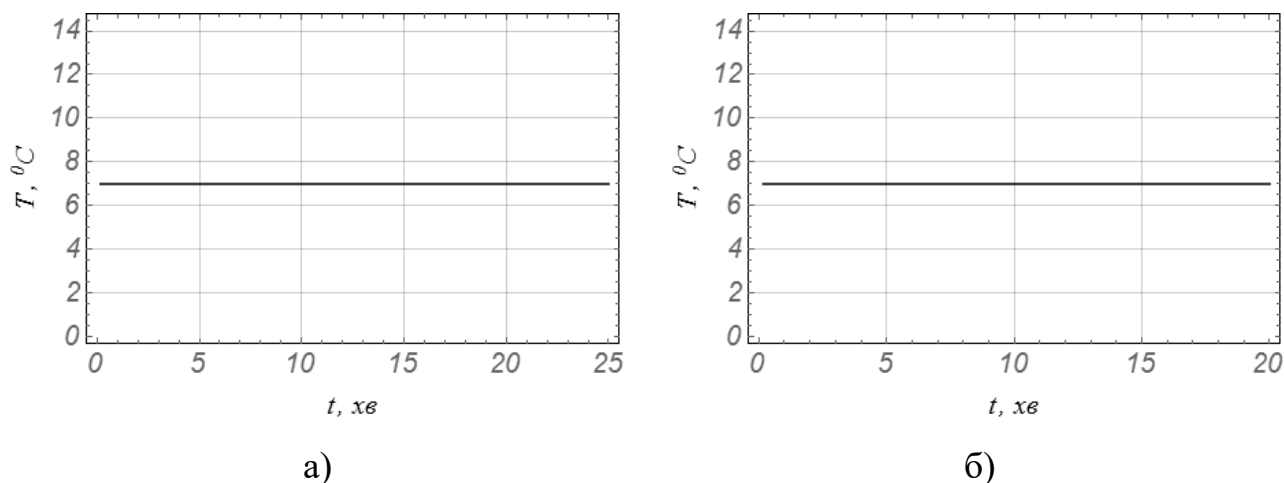


Рис. 4.14. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки.

Експериментальне дослідження енергетичних витрат під час одного циклу термостабілізації об'єму субстрату у біогазовому реакторі для обох систем електричного підігріву, проводилось за температури навколишнього середовища,

значення якої становило $T=7\text{ }^{\circ}\text{C}$, (Додаток Д.1, рис. Д.1.1 момент часу $\Delta t=726,7\ldots 751,5\text{ хв}$) та (рис. 4.14 а), (Додаток Д.2, рис. Д.2.1 момент часу $\Delta t=704,2\ldots 724\text{ хв}$) та (рис. 4.14 б).

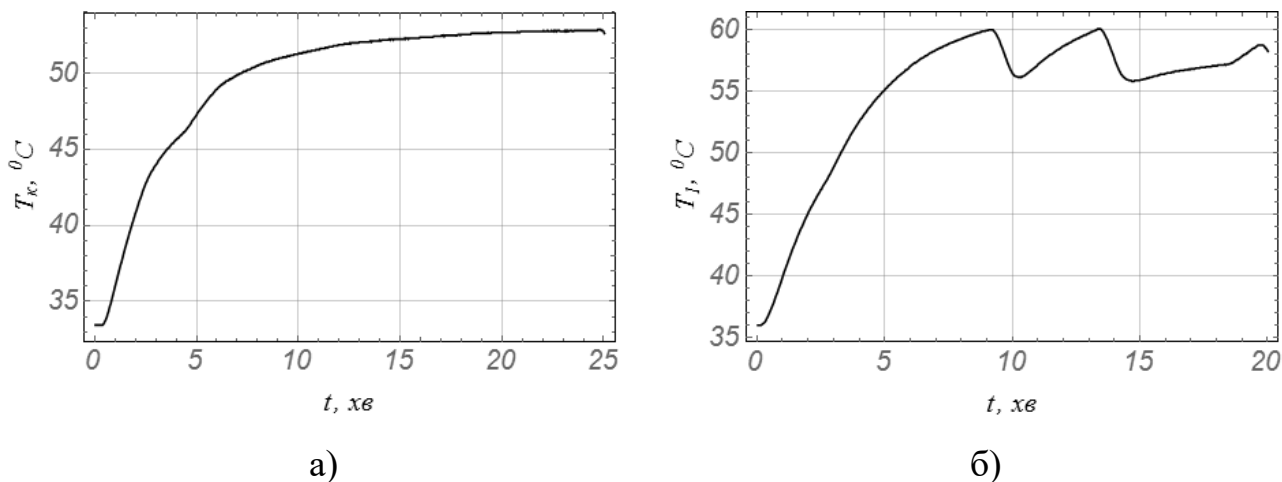


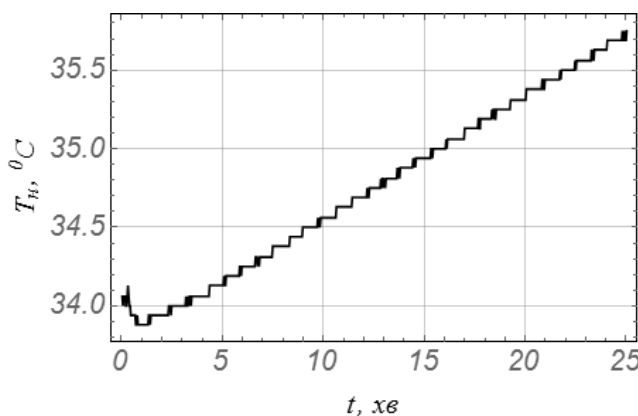
Рис. 4.15. Графік зміни температури електричного нагрівального кабелю:
а) при розміщенні на стінці біогазового реактора; б) при розміщенні у лопатях мішалки

Із графіків зміни температури електричного нагрівального кабелю розміщеного на стінці біогазового реактора (Додаток Д.1, рис. Д.1.3 момент часу $\Delta t=726,7\ldots 751,5\text{ хв}$) та (рис. 4.15 а) видно, що нагрів електричного нагрівального кабелю до максимальної температури, значення якої становить $52,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, відбувається за період часу $24,8\text{ хвилин}$. Середнє значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного на стінці біогазового реактора становить $49,69\text{ }^{\circ}\text{C}$.

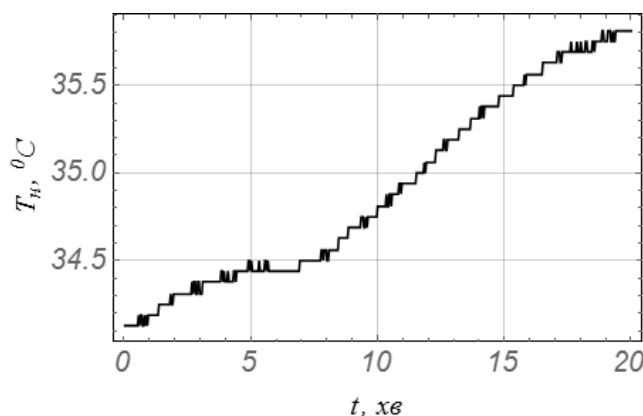
Аналіз графічних залежностей (Додаток Д.2, рис. Д.2.3...Д.2.6, момент часу $\Delta t=704,2\ldots 724\text{ хв}$) та (рис. 4.15 б) показав, що при використанні електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях двоярусної лопатевої мішалки, нагрів електричного нагрівального кабелю до максимальної температури, значення якої становить $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, відбувається за період часу $\Delta t=9,1\text{ хв}$ (рис. 4.15 б). У подальшому, спрацьовує терморегулятор і вимикає підігрівальну

секцію, після чого відбувається охолодження кабелю до температури $56\text{ }^{\circ}\text{C}$, на проміжку часу ($\Delta t = 9,1 \dots 10,1\text{ хв}$). У момент часу $\Delta t = 10,1\text{ хв}$, напруга живлення через ковзні контакти подається на секцію електричного нагріву, відповідно, температура електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопаті мішалки починає зростати (рис. 4.15 б). Середнє значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях двоярусної лопатевої механічної мішалки становить $54,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Порівнюючи між собою обидві системи підігріву, можна відмітити, що середнє значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях двоярусної лопатевої мішалки на $9,5\%$ більше, ніж середнє значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного на стінці біогазового реактора. Максимальне значення температури нагрівального кабелю розміщеного у лопатях мішалки на 12% більше, при цьому, досягнення максимального значення температури електричного нагрівального кабелю при розміщенні останнього у лопатях мішалки відбувається на $63,3\%$ швидше.

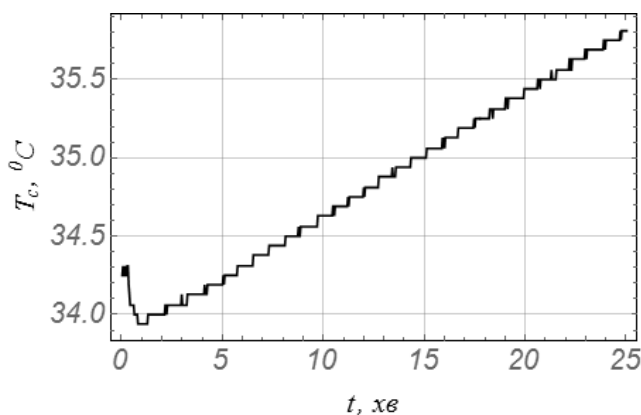


а)

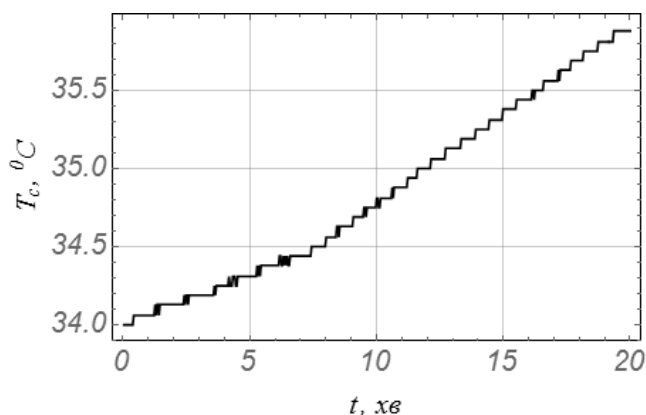


б)

Рис. 4.16. Графік зміни температури субстрату у нижній частині реактора при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки

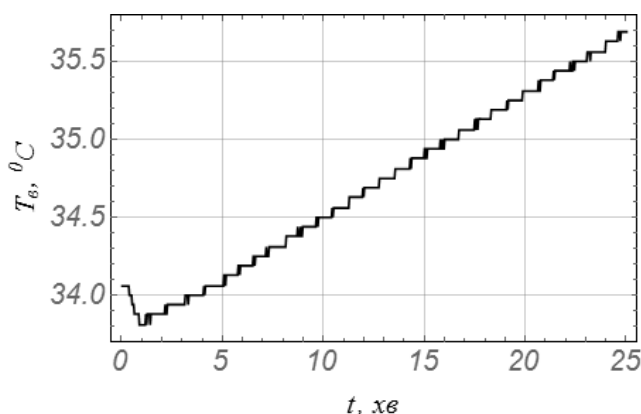


а)

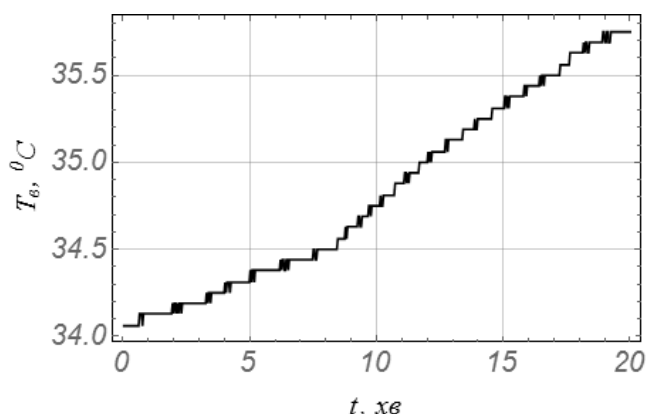


б)

Рис. 4.17. Графік зміни температури субстрату у середній частині реактора при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки



а)



б)

Рис. 4.18. Графік зміни температури субстрату у верхній частині реактора при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки

При розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактора з графічних залежностей зміни температури субстрату у нижній частині реактора (Додаток Д.1, рис. Д.1.8 момент часу $\Delta t = 726,7 \dots 751,5$ хв) та (рис. 4.16 а), середній (Додаток Д.1, рис. Д.1.9 момент часу $\Delta t = 726,7 \dots 751,5$ хв) та (рис. 4.17 а) та верхній (Додаток Д.1, рис. Д.1.10 момент часу $\Delta t = 726,7 \dots 751,5$ хв) та (рис. 4.18 а), помітно, що у початковий момент підігріву та перемішування

субстрату відбувається зниження температури субстрату, мінімальне значення якої становить, для нижнього ярусу $33,87\text{ }^{\circ}\text{C}$, момент часу $\Delta t = 1\text{ хв}$ (рис. 4.16 а), середнього ярусу $33,93\text{ }^{\circ}\text{C}$, момент часу $\Delta t = 1\text{ хв}$ (рис. 4.17 а), верхнього ярусу $33,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, момент часу $\Delta t = 1\text{ хв}$ (рис. 4.18 а).

У подальшому відбувається збільшення температури субстрату за лінійним законом, набуваючи максимального значення температури, значення якої становить, для нижнього ярусу $35,75\text{ }^{\circ}\text{C}$, момент часу $\Delta t = 24,8\text{ хв}$ (рис. 4.16 а), середнього ярусу $35,81\text{ }^{\circ}\text{C}$, момент часу $\Delta t = 24,8\text{ хв}$ (рис. 4.17 а), верхнього ярусу $35,69\text{ }^{\circ}\text{C}$, момент часу $\Delta t = 24,8\text{ хв}$ (рис. 4.18 а). Середнє значення температури субстрату за один цикл підігріву становить $34,73\text{ }^{\circ}\text{C}$. Загальна тривалість одного циклу підігріву субстрату при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці реактора складає 24,8 хвилини.

При розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної механічної мішалки з графічних залежностей зміни температури субстрату у нижній частині реактора (Додаток Д.2, рис. Д.2.8 момент часу $\Delta t = 704,2...724\text{ хв}$) та (рис. 4.16 б), середній (Додаток Д.2, рис. Д.2.9 момент часу $\Delta t = 704,2...724\text{ хв}$) та (рис. 4.17 б), верхній (Додаток Д.2, рис. Д.2.10 момент часу $\Delta t = 704,2...724\text{ хв}$) та (рис. 4.18 б), видно, що у перші 7 хвилин підігріву та перемішування відбувається поступове збільшення температури субстрату, це зумовлено переміщенням холодних потоків мас у реакторі та накопиченням теплової енергії у металоконструкції електротепломеханічної системи, котра при переміщенні лопатей перемішує теплові маси по об'єму субстрату.

У подальшому відбувається збільшення температури субстрату за лінійним законом, набуваючи максимального значення температури, значення якої становить, для нижнього ярусу $35,81\text{ }^{\circ}\text{C}$, момент часу $\Delta t = 19,8\text{ хв}$ (рис. 4.16 б), середнього ярусу $35,88\text{ }^{\circ}\text{C}$, момент часу $\Delta t = 19,8\text{ хв}$ (рис. 4.17 б), верхнього ярусу

35,75 °C, момент часу $\Delta t = 19,8$ хв (рис. 4.18 б). Середнє значення температури субстрату за один цикл підігріву становить 34,95 °C. Мінімальне значення температури субстрату становить 34,0 °C, у момент часу $\Delta t = 0,01$ хв (рис. 4.17 б). Загальна тривалість одного циклу підігріву субстрату при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці реактора складає 19,8 хвилини.

Порівнюючи між собою обидві системи підігріву, можна відмітити, що мінімальне значення температури субстрату при використанні електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву на 0,2 °C менше, середнє значення на 0,22 °C більше, тоді як, максимальне значення температури більше на 0,2%. Досягнення максимального значення температури субстрату при розміщенні нагрівального кабелю у лопатях електротепломеханічної системи відбувається на 20,2% швидше.

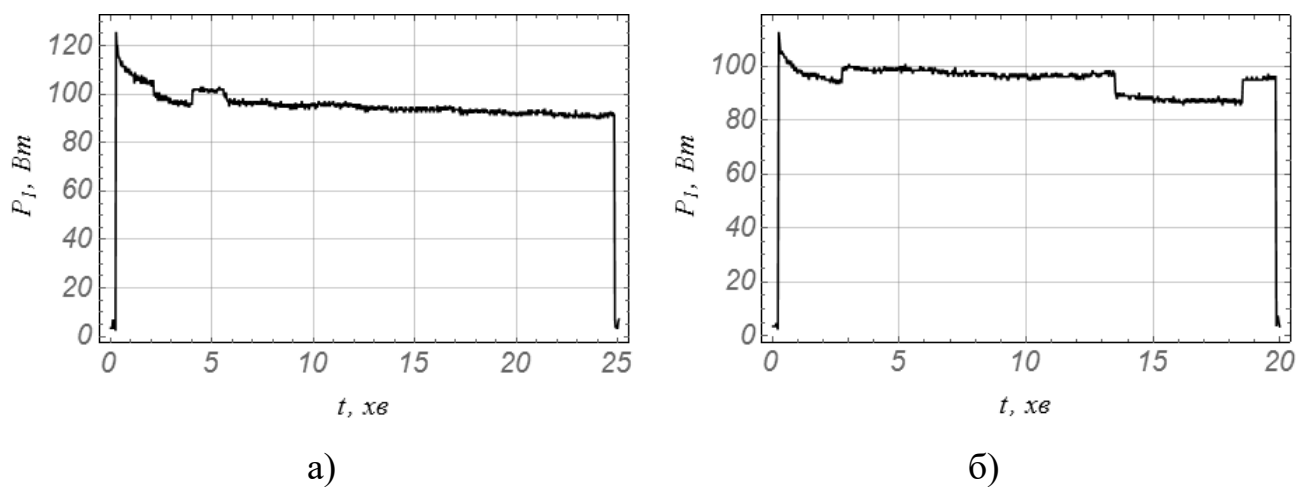


Рис. 4.19. Графік затраченої потужності електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно: а) на стінці біогазового реактора; б) у лопатях мішалки

Аналізуючи графіки затраченої потужності електричним двигуном (Додаток Д.1, рис. Д.1.11 момент часу $\Delta t = 726,7 \dots 751,5$ хв) та (рис. 4.19 а), помітно, що в початковий момент руху, виникає миттєве зростання потужності до значення ($P_1 = 125$ Bm), викликане рушійним моментом, в подальшому

спостерігається плавне зниження потужності споживаної електричним двигуном механічної мішалки, така картина зміни потужності пояснюється фізико-хімічними властивостями речовини, яка на початку перемішування знаходиться у стані спокою, тому перемішувачій системі необхідно подолати інерційні сили для виведення речовини із стану спокою та встановлення направлених потоків, вектори швидкості яких співпадають з векторами швидкості елементів перемішувачої системи [7].

Тривалість підігріву субстрату до температури $35,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці реактора складає 24,8 хв. Електричний двигун перемішувачого пристрою при використанні підігріву розміщеного на стінці реактора за цей час витрачає $W_1 = 141144$ Дж.

З графічних залежностей (Додаток Д.2, рис. Д.2.11 момент часу $\Delta t = 704,2...724$ хв) та (рис. 4.19 б), помітно, що за використання електротепломеханічної системи при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки, у початковий момент руху виникає миттєве зростання потужності до значення ($P_1 = 112\text{ Вт}$), в подальшому відбувається поступове зниження споживаної електричним двигуном потужності, в наслідок фізико-хімічних властивостей субстрату. Тривалість підігріву субстрату до температури $35,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки складає 19,8 хв, за цей час електричний двигун перемішувачого пристрою витрачає $W_1 = 111544$ Дж.

Порівнюючи між собою обидві системи, можна стверджувати, що при використанні електричних нагрівачів розміщених у лопатях двоярусної лопатевої механічної мішалки, електричний двигун перемішувачого пристрою витрачає на 21% менше енергії на один цикл перемішування субстрату за температури навколишнього середовища $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, (рис. 4.14) при цьому, тривалість підігріву субстрату до температури $35,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки менше на 20,2%.

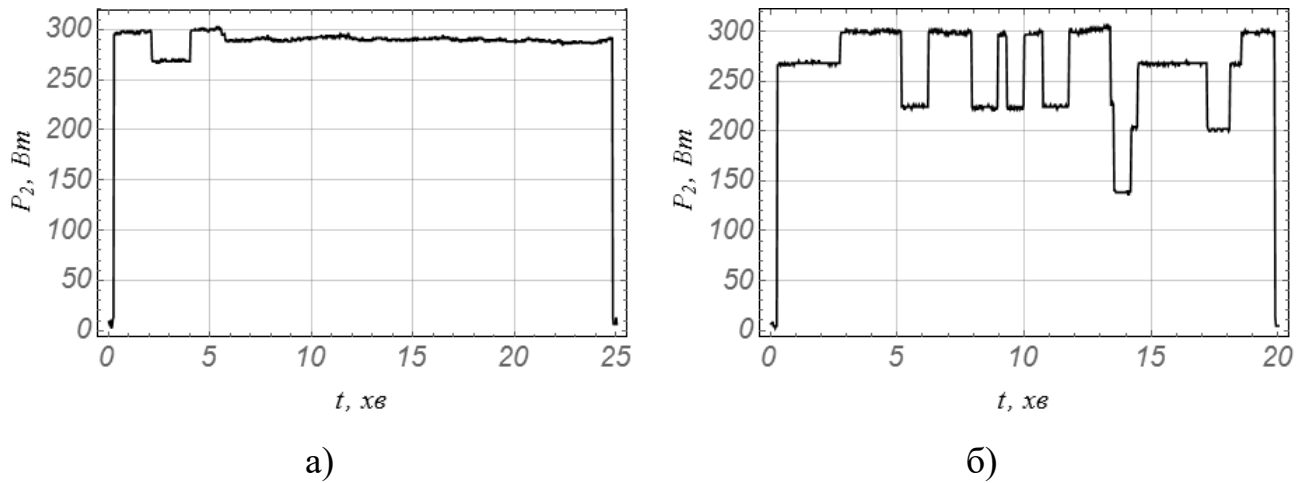


Рис. 4.20. Графік затраченої потужності електричним нагрівальним кабелем:
 а) при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактора; б) при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки

Аналізуючи графіки затраченої потужності електричним нагрівальним кабелем (Додаток Д.1, рис. Д.1.12 момент часу $\Delta t = 726,7 \dots 751,5$ хв) та (рис. 4.20 а), помітно, що при вмиканні нагрівачів відбувається стрибкоподібне зростання потужності до значення ($P_2 = 293$ Вт). Система підігріву виконана із електричного нагрівального кабелю розміщеного на стінці реактора витрачає $W_2 = 426604$ Дж, на процес підігріву субстрату з 34°C до $35,8^\circ\text{C}$ (рис. 4.16 а, рис. 4.17 а, рис. 4.18 а). Середнє значення споживаної потужності електричними нагрівачами складає $P_2 = 286,7$ Вт.

З графічних залежностей (Додаток Д.2, рис. Д.2.12 момент часу $\Delta t = 704,2 \dots 724$ хв) та (рис. 4.20 б), помітно, що за використання електротепломеханічної системи при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки, у момент вмикання нагрівальних секцій виникає стрибкоподібне зростання потужності до значення ($P_2 = 270$ Вт) та залишається майже не змінною протягом ($\Delta t = 0 \dots 2,8$ хв), у подальшому зростаючи до значення номінальної потужності ($P_2 = 300$ Вт). Коливання споживаної потужності, що

спостерігаються на (рис. 4.20 б), з моменту часу ($\Delta t = 5,5 \text{ хв}$) пояснюються процесом ввімкнення-вимкнення електричних нагрівальних секцій, розміщених у лопатях двоярусної лопатевої мішалки, котрі досягають максимально допустимого значення температури 60°C (Додаток Д.2, рис. Д.2.3...Д.2.6) та (рис. 4.16 б, рис. 4.17 б, рис. 4.18 б). Система підігріву виконана із електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки витрачає $W_2 = 310667 \text{ Дж}$, на процес підігріву субстрату з 34°C до $35,8^\circ\text{C}$ (рис. 4.16 б, рис. 4.17 б, рис. 4.18 б). Середнє значення споживаної потужності електричними нагрівачами складає $P_2 = 261,5 \text{ Вт}$.

Порівнюючи між собою обидві системи електричного підігріву, помітно, що при використанні електричних нагрівачів розміщених у лопатях двоярусної лопатевої механічної мішалки, система підігріву витрачає на 27,2% менше енергії на процес підігріву субстрату з 34°C до $35,8^\circ\text{C}$ (рис. 4.16 б, рис. 4.17 б, рис. 4.18 б), а температура навколишнього середовища становила 7°C (рис. 4.14), при цьому, середнє значення споживаної потужності на процес підігріву субстрату у біогазовому реакторі зменшилось на 8,8%.

Зменшення середнього значення споживаної потужності секціями нагріву виконаними електричним нагрівальним кабелем вмонтованим у лопаті двоярусної лопатевої мішалки, пояснюється наявністю системи автоматичного керування підігрівальними секціями, за рахунок чого, при досягненні однієї секції температури 60°C відбувається її вимикання, при цьому, решта секцій підігріву залишаються працювати.

У таблиці 4.1 наведено результати експериментальних досліджень споживання енергії двох систем електричного підігріву, «класичної» – електричний нагрівальний кабель розміщено на стінці реактора, та «раціональної» – при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки, за різних значень температури навколишнього середовища.

**Результати експериментальних досліджень споживання енергії
електричними підігрівачами на один підігрів субстрату**

Температура навколишнього середовища, $T, ^\circ\text{C}$	Підігрів на стінці реактора			Підігрів у лопатях мішалки			Економія, %	
	Енергія $W_2, \text{кДж}$	Середня споживана потужність, Вт	Час роботи підігріву, хв	Енергія $W_2, \text{кДж}$	Середня споживана потужність, Вт	Час роботи підігріву, хв	Енергія	Час
6 ⁽¹⁾	373,469	270,6	23 ⁽⁷⁾	341,943	267,6	21,3 ⁽¹³⁾	8,4	7,4
7 ⁽²⁾	426,604	286,7	24,8 ⁽⁸⁾	310,667	261,5	19,8 ⁽¹⁴⁾	27,2	20,2
8 ⁽³⁾	365,674	268,5	22,7 ⁽⁹⁾	330,034	264,4	20,8 ⁽¹⁵⁾	9,7	8
9 ⁽⁴⁾	344,721	269,7	21,3 ⁽¹⁰⁾	313,051	263,5	19,8 ⁽¹⁶⁾	9,2	7
10 ⁽⁵⁾	352,053	282,1	20,8 ⁽¹¹⁾	319,546	263,6	20,2 ⁽¹⁷⁾	9,2	2,9
11 ⁽⁶⁾	368,624	291,2	21,1 ⁽¹²⁾	324,386	261,2	20,7 ⁽¹⁸⁾	12,0	1,9
Середнє	371,857	278,13	22,28	323,271	263,63	20,43	12,6	7,9

Примітка: 1. Додаток Д.11, рис. Д.11.1 момент часу $t=1144\dots1167$ хв, Додаток Д.14, рис. Д.14.1 момент часу $t=1084\dots1105,3$ хв;
 2. Додаток Д.1, рис. Д.1.1 момент часу $t=726,7\dots751,5$ хв, Додаток Д.2, рис. Д.2.1 момент часу $t=704,2\dots724$ хв;
 3. Додаток Д.13, рис. Д.13.1 момент часу $t=583,5\dots606,2$ хв, Додаток Д.10, рис. Д.10.1 момент часу $t=717,2\dots738$ хв;
 4. Додаток Д.11, рис. Д.11.1 момент часу $t=5,0\dots26,3$ хв, Додаток Д.6, рис. Д.6.1 момент часу $t=70\dots89,8$ хв;
 5. Додаток Д.11, рис. Д.11.1 момент часу $t=198\dots218,8$ хв, Додаток Д.8, рис. Д.8.1 момент часу $t=246,2\dots266,4$ хв;
 6. Додаток Д.3, рис. Д.3.1 момент часу $t=434\dots455,1$ хв, Додаток Д.4, рис. Д.4.1 момент часу $t=420,1\dots440,8$ хв;
 7. Додаток Д.11, рис. Д.11.12 момент часу $t=1144\dots1167$ хв;
 8. Додаток Д.1, рис. Д.1.12 момент часу $t=726,7\dots751,5$ хв;
 9. Додаток Д.13, рис. Д.13.12 момент часу $t=583,5\dots606,2$ хв;
 10. Додаток Д.11, рис. Д.11.12 момент часу $t=5,0\dots26,3$ хв;
 11. Додаток Д.11, рис. Д.11.12 момент часу $t=198\dots218,8$ хв;
 12. Додаток Д.3, рис. Д.3.12 момент часу $t=434\dots455,1$ хв;
 13. Додаток Д.14, рис. Д.14.12 момент часу $t=1084\dots1105,3$ хв;
 14. Додаток Д.2, рис. Д.2.12 момент часу $t=704,2\dots724$ хв;
 15. Додаток Д.10, рис. Д.10.12 момент часу $t=717,2\dots738$ хв;
 16. Додаток Д.6, рис. Д.6.12 момент часу $t=70\dots89,8$ хв;
 17. Додаток Д.8, рис. Д.8.12 момент часу $t=246,2\dots266,4$ хв;
 18. Додаток Д.4, рис. Д.4.12 момент часу $t=420,1\dots440,8$ хв;

Проаналізувавши результати експериментальних досліджень споживання енергії електричними підігрівачами на один цикл підігріву субстрату з $34\text{ }^\circ\text{C}$ до $35,8\text{ }^\circ\text{C}$, зроблено висновок, що за використання нагрівального кабелю розміщеному у лопатях двоярусної лопатевої мішалки економія енергії

знаходиться у межах від 8,4% до 27,2%, а по часу, економія становить від 1,9% до 20,2%, в залежності від температури навколишнього середовища. Споживання енергії на процес електричного підігріву субстрату за інших температур навколишнього середовища наведено у графічному вигляді у додатку Д.

Об'єм утвореного у ході процесу анаеробного зброджування субстрату біогазу, залежить від багатьох факторів, серед яких: тип та фізико-хімічний склад органічної речовини; частка концентрації поживних речовин та твердої фракції органічної речовини; забезпечення безкисневого середовища під час процесу анаеробного зброджування; температурного режиму зброджування субстрату; підтримки стабільної та рівномірно розподіленої температури субстрату, що зброджується; присутності бактерій, що виробляють метан [76].

Вироблений об'єм біогазу за час експериментальних досліджень, 168 годин, складає: для «класичної» системи електричного підігріву на стінці біогазового реактора – 138,4 л, графічна залежність виходу об'єму біогазу по днях наведено у (Додатку Д.15, рис. Д.15.1 а), об'єм метану у виробленому біогазі складає 52,9%, вуглекислого газу 42,4%, решта газів 4,9%; для «раціональної» системи електричного підігріву вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки – 148,5 л, графічна залежність виходу об'єму біогазу по днях наведено у (Додатку Д.15, рис. Д.15.1 б), об'єм метану у виробленому біогазі складає 54,8%, вуглекислого газу 40,7%, об'єм решти газів 4,5%.

Провівши аналіз отриманих даних наведених у (Додатку Д.15, рис. Д.15.1 а, та рис. Д.15.1 б) помітно, що за використання «раціональної» системи електричного підігріву вмонтованого у лопаті мішалки, за однаковий період експериментальних досліджень (168 годин) утворилося на 6,8% більше біогазу, при цьому, вміст метану більше на 3,5%, вміст вуглекислого газу менший на 4%, вміст решти газів менший на 8,2% ніж при використанні «класичної» системи електричного підігріву субстрату. Це пояснюється рівномірним розподілом температурних полів у субстраті, що знаходиться у біогазовому реакторі.

Для інших типів субстрату значення виходу біогазу та вмісту у ньому метану, вуглекислого газу та інших газів може відрізнятись [76].

4.4. Порівняння теоретичних та експериментальних даних при підігріві та перемішуванні субстрату у біогазовому реакторі

Проведено аналіз розбіжностей між теоретичними та експериментальними даними для зміни температури субстрату при підігріві та перемішуванні останнього у біогазовому реакторі, а також кількості витраченої енергії на процес підігріву субстрату. Для цього, розглянуто динамічні характеристики зміни температури субстрату у реакторі, які визначені теоретично за таким режимом підігріву коли нагрівальний кабель розміщений у лопатях електротепломеханічної системи (рис. 2.26) та коли нагрівальний кабель розміщений на стінці біогазового реактора (рис. 2.17), та дані отриманні в ході проведення експериментальних досліджень на виготовленій установці біогазового реактора з електротепломеханічною системою наведених на (рис. 4.17 а) та (рис. 4.17 б).

На рис. 4.21 зображено в графічному вигляді порівняння та розбіжності між отриманими теоретичними та експериментальними даними електричного підігріву та перемішування субстрату при використанні нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті електротепломеханічної системи (рис. 4.21 а) та нагрівального кабелю розміщеного на стінці біогазового реактора (рис. 4.21 б).

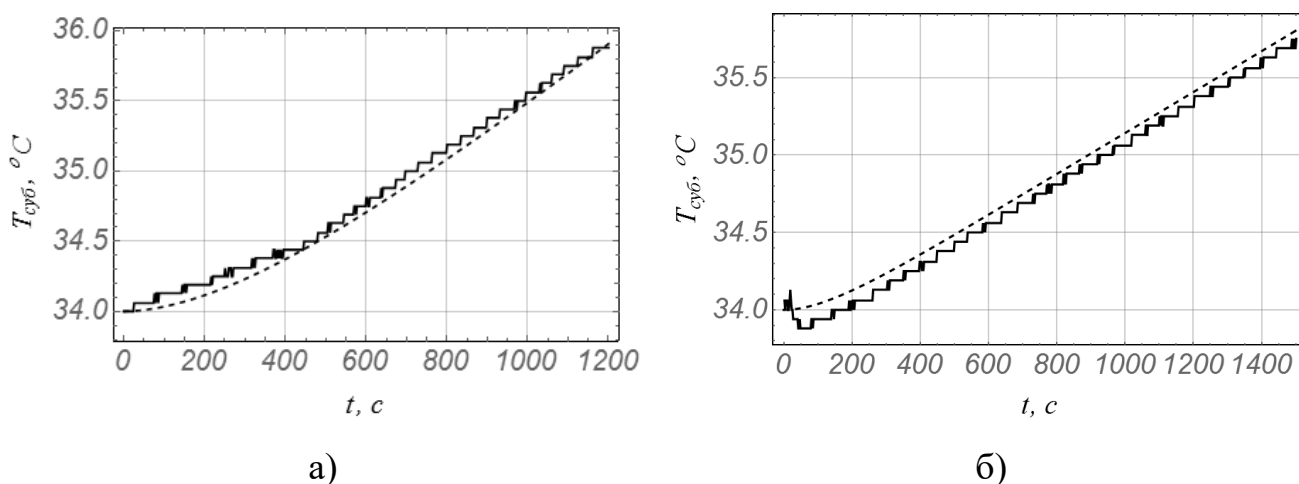


Рис. 4.21. Порівняння графічних залежностей температури субстрату отриманих теоретичних та експериментальних даних при розміщенні електричного нагрівального кабелю: а) у лопатях електротепломеханічної системи; б) на стінці біогазового реактора; -- теоретичні дані; – експериментальні дані.

Наведена графічна залежність зміни температури субстрату при розміщенні нагрівального кабелю у лопатях електротепломеханічної системи (рис. 4.21 а) показує, що відхилення між теоретичними та експериментальними даними за середньою температурою складає 0,1%, за значенням максимальної температури 0,076%. Максимальне відхилення температури субстрату становить 0,29%, у момент часу $\Delta t = 90$ с. Відхилення знаходяться у межах похибки вимірювання.

З графічної залежності зміни температури субстрату при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактора (рис. 4.21 б) видно, що відхилення між теоретичними та експериментальними даними за середньою температурою складає 0,3%, за значенням максимальної температури 0,1%. Максимальне відхилення температури субстрату становить 0,4%, у момент часу $\Delta t = 75$ с. Відхилення знаходяться у межах похибки вимірювання [21].

Теоретично визначене значення кількості витраченої енергії на процес підігріву субстрату за використання нагрівального кабелю розміщеного у лопатях електротепломеханічної системи складає $W_2 = 3259872$ Дж (Розділ 2, пункт 2.3.2). Кількість витраченої енергії отримана у ході проведення експериментальних досліджень складає $W_2 = 310667$ Дж (рис. 4.19 б). Теоретично визначене значення кількості витраченої енергії на процес підігріву субстрату за використання нагрівального кабелю розміщеного на стінці біогазового реактора складає $W_1 = 4083072$ Дж (Розділ 2, пункт 2.3.1). Кількість витраченої енергії отримана у ході проведення експериментальних досліджень складає $W_2 = 426604$ Дж (рис. 4.19 а). Порівнюючи кількість витраченої енергії на процес підігріву субстрату видно, що відхилення між теоретичними та експериментальними даними, у випадку використання електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях електротепломеханічної системи, складає 4,7%, а у випадку використання електричного нагрівального кабелю розміщеного на стінці біогазового реактора становить 4,3% [21].

Враховуючи, що нормально допустимим відхиленням напруги вважається діапазон у $\pm 5\%$, а значення витраченої енергії прямо пропорційно напрузі

живлення, тому, можна зробити висновок, що відхилення між теоретичними та експериментальними даними знаходиться у межах нормально допустимого відхилення напруги живлення нагрівачів.

Висновки до четвертого розділу

1. При порівнянні між собою експериментальних досліджень витрати енергії на початковий нагрів субстрату до температури зброджування за обох систем електричного підігріву видно, що середнє значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях двоярусної лопатевої мішалки на 15% більше, а максимальне значення температури електричного нагрівального кабелю на 12% більше. Час початкового нагріву субстрату до температури зброджування при використанні електричних підігрівачів вмонтованих у лопаті двоярусної мішалки на 5% менший.

2. Порівнюючи між собою обидві системи, помітно, що при використанні електричних нагрівачів розміщених у лопатях двоярусної лопатевої механічної мішалки, система підігріву витрачає на 6,6% менше енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування при цьому, середнє значення споживаної потужності електричними нагрівачами зменшилось на 1,5%.

3. Порівнюючи між собою обидві системи видно, що при використанні електричних нагрівачів розміщених у лопатях двоярусної лопатевої механічної мішалки, електричний двигун перемішуючого пристрою витрачає у 5,3% менше енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування.

4. Порівнюючи між собою обидві системи видно, що тривалість охолодження субстрату при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки на 25,2% більше. Максимальне значення температури субстрату на 0,12°C більше, при цьому, тривалість підтримки максимальної температури субстрату при розміщенні нагрівального кабелю у лопатях мішалки на 59,3% більше. Середнє значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях мішалки на 5,4% більше, при цьому мінімальне значення температури електричного нагрівального кабелю на 4,5% більше. Охолодження

кабелю до температури 36,5°C при використанні системи з нагрівальним кабелем розміщеним у лопатях мішалки відбувається на 85,1% повільніше.

5. Порівнюючи між собою обидві системи підігріву, помітно, що за одного циклу термостабілізації субстрату середнє значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях двоярусної лопатевої мішалки на 9,5% більше ніж середнє значення температури нагрівального кабелю розміщеного на стінці реактора. Максимальне значення температури нагрівального кабелю розміщеного у лопатях мішалки на 12% більше, при цьому, досягнення максимального значення температури нагрівального кабелю при розміщенні останнього у лопатях мішалки відбувається на 63,3% швидше.

6. Порівнюючи між собою обидві системи підігріву, видно, що мінімальне значення температури субстрату при використанні електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву на 0,2°C менше, середнє значення на 0,22°C більше, тоді як, максимальне значення температури більше на 0,2%. Досягнення максимального значення температури субстрату при розміщенні нагрівального кабелю у лопатях електротепломеханічної системи відбувається на 20,2% швидше.

7. Порівнюючи між собою обидві системи видно, що при використанні електричних нагрівачів розміщених у лопатях двоярусної лопатевої механічної мішалки, електричний двигун перемішуючого пристрою витрачає на 21% менше енергії на один цикл перемішування субстрату за температури навколишнього середовища 7°C, при цьому, тривалість підігріву субстрату до температури 35,8°C, при розміщенні нагрівального кабелю у лопатях мішалки менше на 20,2%.

8. За результатами експериментальних досліджень споживання енергії електричними підігрівачами на один цикл підігріву субстрату з 34°C до 35,8°C, визначено, що за використання нагрівального кабелю розміщеному у лопатях двоярусної лопатевої мішалки економія енергії знаходиться у межах від 8,4% до 27,2%, а по часу, економія становить від 1,9% до 20,2%, в залежності від температури навколишнього середовища.

9. У ході експериментальних досліджень виявлено, що за використання

«раціональної» системи електричного підігріву вмонтованого у лопаті мішалки, за однаковий період експериментальних досліджень (168 годин) утворилося на 6,8% більше біогазу, при цьому, вміст метану більше на 3,5%, вміст вуглекислого газу менший на 4%, вміст решти газів менший на 8,2% ніж при використанні «класичної» системи електричного підігріву субстрату.

10. Визначено відхилення між теоретичними та експериментальними даними зміни температури субстрату при розміщені нагрівального кабелю у лопатях електротепломеханічної системи, за середньою температурою складає 0,1%, за значенням максимальної температури 0,076%. Максимальне відхилення температури субстрату 0,29%. Відхилення знаходяться у межах похибки вимірювання.

11. Теоретично визначене значення кількості витраченої енергії на процес підігріву субстрату за використання електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях електротепломеханічної системи складає $W_2 = 3259872$ Дж, а кількість витраченої енергії отримана у ході проведення експериментальних досліджень складає $W_2 = 310667$ Дж, що на 4,7% менше.

12. Відхилення між теоретичними та експериментальними даними знаходиться у межах нормально допустимого відхилення напруги живлення електричних нагрівачів.

13. Визначено відхилення між теоретичними та експериментальними даними зміни температури субстрату при розміщені нагрівального кабелю на стінці реактора, за середньою температурою складає 0,3%, за значенням максимальної температури 0,1%. Максимальне відхилення температури субстрату 0,4%.

14. Теоретично визначене значення кількості витраченої енергії на процес підігріву субстрату за використання електричного нагрівального кабелю розміщеного на стінці біогазового реактора складає $W_1 = 4083072$ Дж, а кількість витраченої енергії отримана у ході проведення експериментальних досліджень складає $W_2 = 426604$ Дж, що на 4,3% більше.

РОЗДІЛ 5

РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ У БІОГАЗОВОМУ РЕАКТОРІ

5.1. Запропонована електротепломеханічна система для перемішування та підігріву органічної сировини у біогазовому реакторі

Рентабельність біогазових установок прямопропорційна кількості енергії витраченої на процеси інтенсифікації анаеробного зброджування. Мікробіологічні особливості зброджування вимагають дотримання чітких меж режимів температурної стабілізації, рівномірного розподілу температурних полів, відсутності зон перегріву та охолодження. Перспективними шляхами вдосконалення обладнання для інтенсифікації процесу анаеробного зброджування є механічне перемішування [22, 71].

Основними принципами зменшення енергетичних витрат на процеси анаеробного бродіння у біогазовому реакторі є:

- рівномірне розподілення температурних полів по об'єму субстрату;
- контрольоване перемішування за наперед заданим законом;
- автоматизована система контролю над процесом підігріву та перемішування субстрату;
- відсутність налипання часточок субстрату на поверхню нагрівачів.

Враховуючи наведені принципи, розроблено рекомендації з модернізації системи перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі. Запропоновано знизити енергетичні витрати на процеси інтенсифікації анаеробного бродіння, а саме підігріву та перемішування субстратів, з метою підвищення продуктивності біогазового реактора, зменшення часу підігріву та перемішування субстрату. Для досягнення поставленої мети, запропоновано вдосконалити систему підігріву та перемішування субстрату у біогазовому реакторі за рахунок поєднання двох процесів у електротепломеханічну систему.

Запропонована електротепломеханічна система зображена на (рис. 5.1).

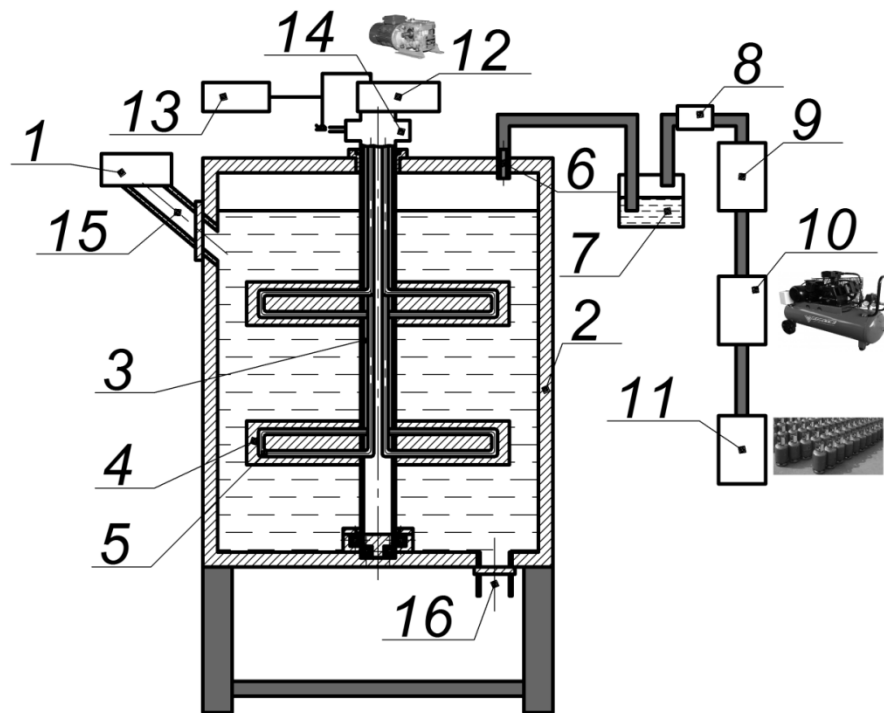


Рис. 5.1. Електротепломеханічна система для перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі: 1 – ємність підготовки субстрату до зброджування; 2 – біогазовий реактор; 3 – комбінована система перемішування та підігріву; 4 – лопать; 5 – електричний нагрівальний кабель із вуглецевого волокна; 6 – штуцер відведення біогазу; 7 – водяний затвор; 8 – лічильник кількості метану; 9 – сухий газгольдер; 10 – компресор високого тиску; 11 – газові балони; 12 – мотор-редуктор; 13 – блок автоматичного контролю та керування; 14 – рухомі контакти; 15 – канал завантаження свіжого субстрату; 16 – канал вивантаження переробленого шламу.

На початку процесу у ємності (1) відбувається підготовка свіжого субстрату до необхідної вологості 90% та початкової температури 9°C. Після чого, завантажується у біогазовий реактор (2) на 2/3 частини від загального об'єму. За допомогою запропонованої системи (3) відповідно до отриманих даних з вимірювальних датчиків температури субстрату, нагрівальних елементів та навколишнього середовища, відбувається автоматичне перемішування та підігрів субстрату до температури зброджування. Біогаз, який утворюється у процесі бродіння через штуцер відведення біогазу (6) надходить до водяного затвору (7)

після чого, через лічильник кількості метану (8) у сухий газгольдер (9) де накопичується, а звідти, відкачується компресором високого тиску (10) у газові балони (11) і в подальшому використовується, як паливо для опалення приміщень, а також для двигунів внутрішнього згорання.

Підігрів субстрату у біореакторі виконується електричним нагрівальним кабелем із вуглецевого волокна (5) розміщеним у лопатях (4) встановлених під кутом α , та порожнистому валу (3), нагрівальний кабель (5) з'єднаний секціями, тобто, кожна лопать є окремим нагрівальним елементом із власним автоматичним керуванням (13). Електричний нагрівальний кабель під'єднується через вибухобезпечні ковзні контакти до джерела живлення постійного або змінного електричного струму. Правила техніки та пожежної безпеки при будівництві та використанні біогазових установок наведено у літературних джерелах [174–178]. Схема захисту електричного двигуна та нагрівального кабелю зібрана у монтажному блоці (Розділ 3, рис. 3.20), до якого підводиться живлення від мережі або від альтернативних джерел енергії, сонячних батарей, вітрогенераторів та інше. Електричні принципові схеми керування електричним двигуном та нагрівальним кабелем наведено у розділі 3 на рис. 3.18 та рис. 3.19 відповідно.

Розміщення підігрівача безпосередньо у лопатях дозволяє збільшити площу нагрівання та досягти рівномірного розподілу температурного поля у біогазовому реакторі. Кут нахилу α лопаті вибирається за умови найменшого споживання енергії, ефективності перемішування і залежить від фізичних параметрів використаного органічного субстрату, а також швидкості обертання робочого органу мішалки. Використання даної системи дозволяє забезпечити менше споживання енергії у результаті вмикання нагрівачів на різну потужність нагріву.

Технічне рішення запропонованої електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі забезпечує збільшення площі контакту субстрату з нагрітою поверхнею, зменшення часу нагріву, за рахунок перемішування підвищується вивільнення утвореного біогазу, рівномірний розподіл популяції бактерій, зменшення енергоспоживання на підтримку стабільної температури метаногенезу,

підвищення коефіцієнту тепловіддачі та рівномірності температурного поля в біогазовому реакторі за рахунок об'єднання поверхонь перемішування і нагрівання, що направлене на підвищення енергетичної ефективності процесів інтенсифікації і продуктивності біогазової установки.

Запропоновані рекомендації по модернізації системи перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазовому реакторі захищено 1 патентом України на винахід [11] (Додаток Е) та 1 патентом України на корисну модель [10] (Додаток Е).

5.2. Запропонована методика визначення виробленого об'єму біогазу

Підчас анаеробного зброджування субстрату відбувається виділення біогазу, об'єм якого є змінним у часі і залежить від ступеня розкладання органічної речовини, рівномірності температурного поля, вологості, наявності кірки, частоти перемішування, кількості сухої органічної речовини та інше. Визначення об'єму виробленого біогазу є надзвичайно складним та одночасно важливим завданням. Враховуючи вище зазначене, розроблено пристрій для визначення утвореного об'єму біогазу, конструкція якого наведена на рис. 5.2.

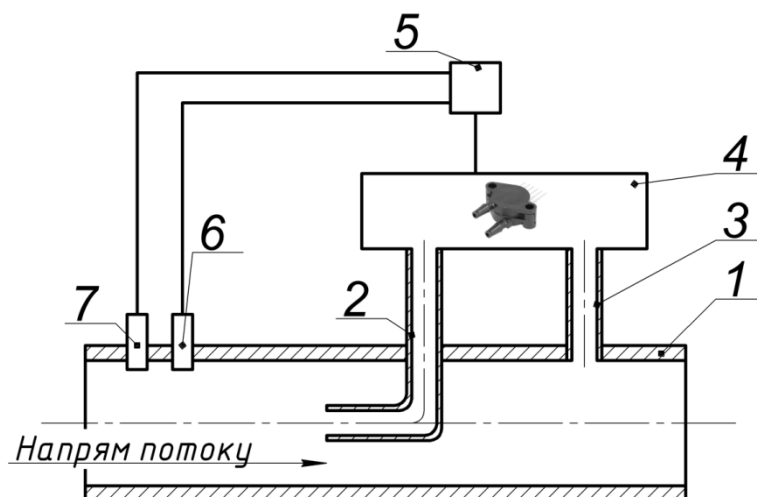


Рис. 5.2. Конструкція вимірювального пристрою для визначення утвореного об'єму біогазу [12]: 1 – газопровід; 2, 3 – трубки вимірювання динамічного та статичного тисків; 4 – датчик диференціального тиску; 5 – мікроконтролер; 6 – датчик температури; 7 – газоаналізатор метану (CH_4) та вуглекислого газу (CO_2)

Пристрій для вимірювання утвореного об'єму біогазу містить газопровід 1, зігнуту під прямим кутом трубку 2 та пряму трубку 3, диференціальний датчик тиску 4, мікроконтролерний пристрій обчислення, реєстрації і відображення інформації 5, датчик температури біогазу 6, газоаналізатор 7 [12].

Пристрій працює наступним чином. Біогаз, утворений у ході зброджування органічної біомаси у біогазовому реакторі має надлишковий тиск, тому потрапляючи у газопровід 1 рухається у напрямку встановленої у газопроводі загнутої під прямим кутом трубки 2, яка відкритим соплом виводиться назустріч потоку біогазу і сприймає сумарний тиск потоку, трубка 3 через просвердлений отвір приєднана до циліндричної поверхні газопроводу 1 вимірює статичний тиск, тоді як, протилежні кінці обох трубок 2 та 3, приєднуються до диференціального датчику тиску 4. Дані з датчиків тиску 4, температури біогазу 6 та газоаналізатора 7 оброблюються у мікроконтролерному пристрої обчислення, реєстрації і відображення інформації 5 [12].

У виділеному біогазі згідно [37, 168] міститься 50 – 75% метану (CH_4), 25 – 50% вуглекислого газу (CO_2) та 1 – 2% решти домішок, серед яких найбільш розповсюджені: сірководень (H_2S), аміак (NH_3), азот (N_2), водень (H_2). Така кількість домішок решти газів, не має суттєвого впливу на кількість виробленого метану. Тому, вимірявши об'ємну долю метану та вуглекислого газу у біогазі, можливо визначити сумарний вміст решти газів за формулою [12]:

$$A_{об} = 100 - (A_{\text{CH}_4} + A_{\text{CO}_2}), \quad (5.1)$$

де: $A_{об}$ – сумарний вміст решти газів у біогазі, %; A_{CH_4} , A_{CO_2} – вміст метану (CH_4) та вуглекислого газу (CO_2) у утвореному об'ємі біогазу, %.

Відповідно, до запропонованого методу вимірювання об'єму утвореного біогазу, швидкість потоку біогазу визначається за формулою [12]:

$$g = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{сер}}}, \quad (5.2)$$

де: $\rho_{сер}$ – середня густина біогазу, кг/м^3 ; ΔP – диференціальний тиск, Па.

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad (5.3)$$

де: P_1, P_2 – тиск виміряний у зоні потоку біогазу та статичний тиск відповідно, Па.

Густина газів залежить від температури, тому щоб уникнути похибки вимірювання у систему введено датчик температури котрий вимірює температуру потоку біогазу та передає цю інформацію у мікроконтролер [12].

Газоаналізатор вимірює об'ємну долю газів котрі містяться у біогазі, згідно формули (5.1) визначаємо сумарний вміст решти газів у біогазі, таким чином, середня густина біогазу $\rho_{сер}$, визначається за наступною залежністю:

$$\rho_{сер} = \Delta_{об} \cdot \rho_{сер \Delta_{об}(t)} + \Delta_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4(t)} + \Delta_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2(t)}, \quad (5.4)$$

де: $\rho_{CH_4(t)}, \rho_{CO_2(t)}$ – густина метану (CH_4) та вуглекислого газу (CO_2) при температурі (t) , $кг/м^3$; $\rho_{сер \Delta_{об}(t)}$ – середня густина решти газів у біогазі при температурі (t) , $кг/м^3$,

$$\rho_{сер \Delta_{об}(t)} = \frac{\sum \rho_{j(t)}}{n}, \quad (5.5)$$

де: $\sum \rho_{j(t)}$ – сума густини j -тих газів котрі знаходяться у об'ємі біогазу при температурі (t) , $кг/м^3$; n – кількість типів газів, котрі знаходяться у утвореному об'ємі біогазу.

Швидкість потоку біогазу залежить від інтенсивності його утворення, отже, для визначення об'єму біогазу необхідно знати час протягом якого швидкість потоку залишалася сталою. Математично це матиме наступний вигляд [12]:

$$V_i = \mathcal{Q}_i \cdot S_i \cdot t_i, \quad (5.6)$$

де: V_i – i -тий об'єм виробленого біогазу, $м^3$; $\mathcal{Q}_i$ – i -та швидкість потоку біогазу у трубопроводі, $м/с$; S – площа найменшого поперечного перерізу газового каналу, $м^2$; t_i – час, протягом якого швидкість потоку біогазу залишалася сталою, $с$.

Тоді, сумарний об'єм утвореного біогазу V знаходимо за виразом:

$$V = \sum V_i \quad (5.7)$$

Для оцінки адекватності запропонованого методу визначення об'єму біогазу, проведено моделювання потоку газу через вимірювальний пристрій у програмі Solidworks у пакеті Flow Simulation. 3D модель зображена на рис. 5.3.

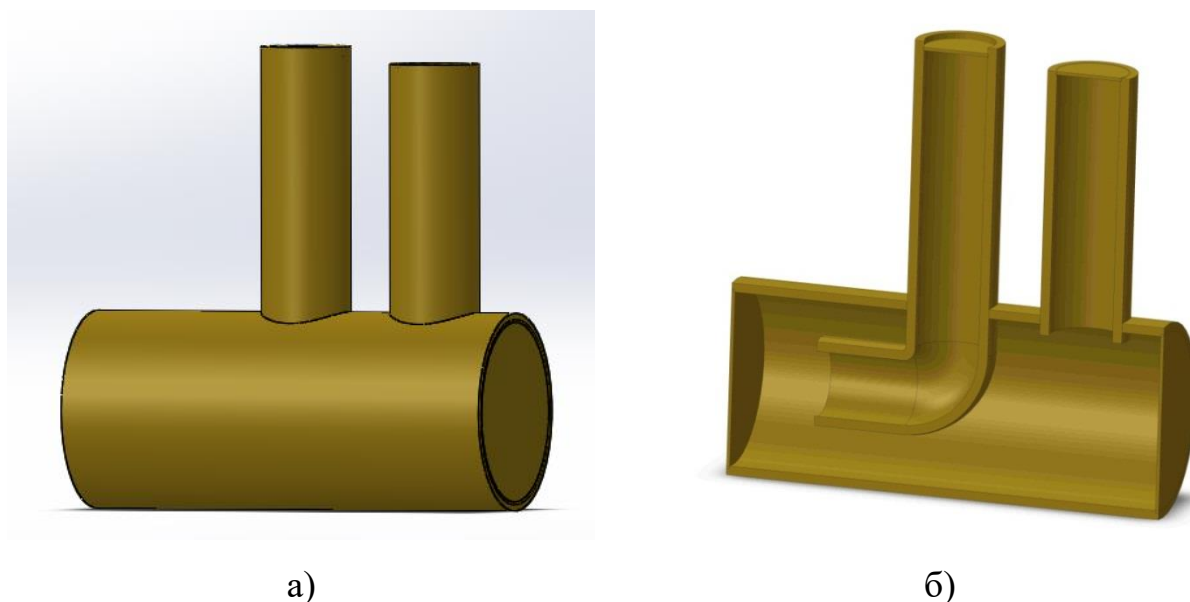


Рис. 5.3. 3D модель: а) зовнішній вигляд; б) поперечний розріз.

Початкові умови моделювання: об'ємна витрата біогазу на вході та виході газопроводу $0,0012 \text{ м}^3/\text{с}$; температура біогазу 35°C ; атмосферний тиск 101325 Па ; діаметр газопроводу 20 мм ; питома густина біогазу $0,68 \text{ кг/м}^3$.

Результати 3D моделювання наведено на рис. 5.4.

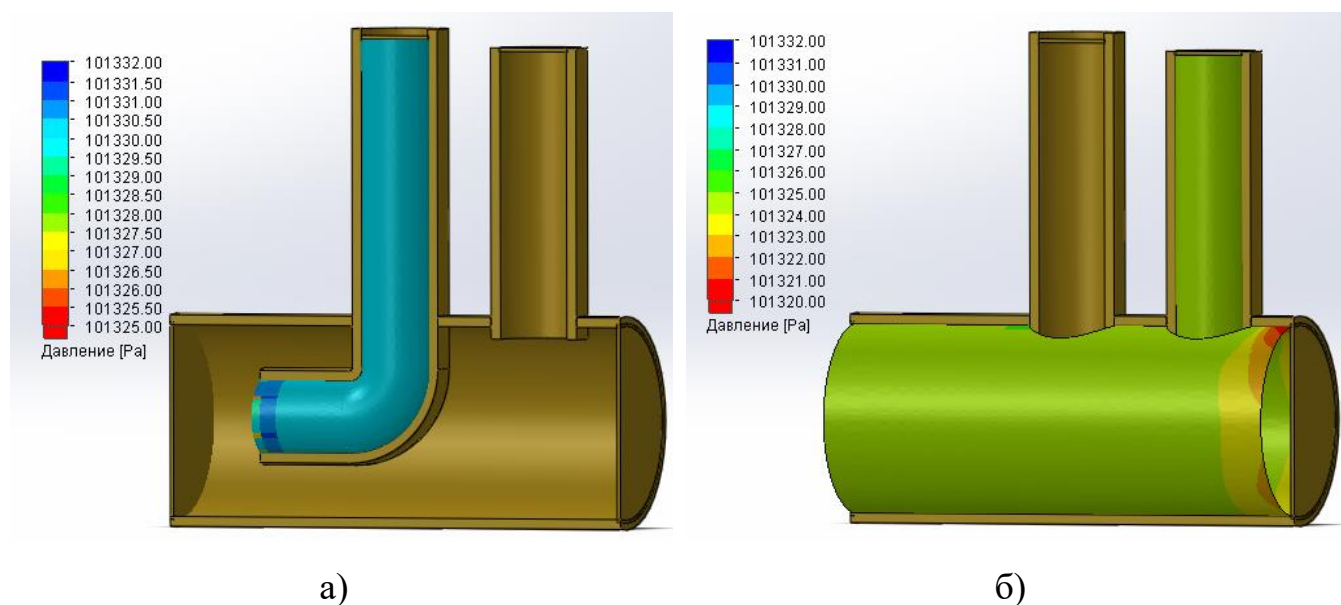


Рис. 5.4. Результати 3D моделювання: а) розподіл тиску у вимірювальній трубці Піто; б) розподіл тиску у газопроводі.

Згідно з отриманими даними тиску у газопроводі та трубці Піто, проведено розрахунок за формулами (5.2, 5.3 та 5.6) для визначення об'ємної витрати біогазу через газопровід протягом часу в 1 секунду.

Швидкість потоку, m/s :

$$g = \sqrt{\frac{2 \cdot 5}{0,68}} = 3,83.$$

Диференціальний тиск, Pa :

$$\Delta P = 101330 - 101325 = 5.$$

Об'ємна витрата утвореного біогазу через газопровід діаметром 20 мм за 1 секунду, m^3/s :

$$V = 3,83 \cdot 0,000314 = 0,0012.$$

У ході 3D моделювання встановлена величина об'ємної витрати біогазу на вході та виході рівна $0,0012 m^3/s$, розрахована $0,0012 m^3/s$. Підчас порівняльного аналізу, виявлено, що отримані аналітичні результати співпадають з результатами 3D моделювання, на основі цього, можна зробити висновок про адекватність та високу точність запропонованого методу визначення вихідного об'єму біогазу з біогазового реактора.

Технічне рішення запропонованого та розробленого пристрою для вимірювання утвореного об'єму біогазу забезпечує безперервну реєстрацію протягом i -го проміжку часу (5.6), а також, встановлення повного об'єму виробленого біогазу протягом усього або частини циклу анаеробного зброджування субстрату (5.7). Також, запропонований пристрій дає змогу проводити вимірювання у магістралях зі змінним потоком у часі та для потоків із високою швидкістю. Пристрій можливо використовувати у будь-якій геометричній площині та під будь-яким кутом одночасно з безперервною реєстрацією показників [12].

Запропонований пристрій для вимірювання утвореного у біогазовому реакторі об'єму біогазу захищено патентом України на корисну модель [12]

(Додаток Е).

5.3. Підвищення енергетичної ефективності роботи біогазового реактора з електротепломеханічною системою за рахунок зменшення витрати енергії на процеси перемішування та підігріву субстрату

Проаналізувавши роботу експериментальної установки біогазового реактора з електротепломеханічною системою для перемішування та електричного підігріву субстрату протягом проведеного безперервного експериментального дослідження, тривалість якого складає 168 годин, результати експериментального дослідження наведено у 4 розділі та у Додатку Д, вказує, що при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки витрачається менше часу, а відповідно і електричної енергії на процес електричного підігріву органічного субстрату у біогазовому реакторі (Розділ 4, таблиця 4.1).

Згідно з технологічним процесом анаеробного зброджування органічних відходів у біогазовому реакторі, одночасно з електричним підігрівом вмикається система перемішування, при цьому, тривалість роботи електричного підігріву та перемішування співпадають по часу.

Внаслідок вище сказаного, для співставлення енергетичної ефективності двох систем, які призначені для перемішування та електричного підігріву субстрату у біогазових реакторах, необхідно розглянути витрату енергії для обох процесів.

У таблиці 5.1 наведено результати експериментальних досліджень споживання електричної енергії електричним двигуном системи перемішування за різних значень температури навколишнього середовища, при використанні двох систем електричного підігріву, «класичної» – електричний нагрівальний кабель розміщено на стінці біогазового реактора, та «раціональної» – при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки.

Результати експериментальних досліджень споживання енергії електричним приводом мішалки за один цикл підігріву субстрату

Температура навколишнього середовища, T , °C	Підігрів на стінці реактора			Підігрів у лопатях мішалки			Економія, %	
	Енергія W_1 , кДж	Середня споживана потужність, Вт	Час роботи перемішування хв	Енергія W_1 , кДж	Середня споживана потужність, Вт	Час роботи перемішування хв	Енергія	Час
6 ⁽¹⁾	126,441	91,6	23 ⁽⁷⁾	124,701	97,6	21,3 ⁽¹³⁾	1,4	7,4
7 ⁽²⁾	141,144	94,9	24,8 ⁽⁸⁾	111,544	93,9	19,8 ⁽¹⁴⁾	21	20,2
8 ⁽³⁾	119,805	88,0	22,7 ⁽⁹⁾	119,447	95,7	20,8 ⁽¹⁵⁾	0,3	8
9 ⁽⁴⁾	111,314	87,1	21,3 ⁽¹⁰⁾	110,334	92,8	19,8 ⁽¹⁶⁾	0,9	7
10 ⁽⁵⁾	112,657	90,3	20,8 ⁽¹¹⁾	110,606	91,2	20,2 ⁽¹⁷⁾	1,8	2,9
11 ⁽⁶⁾	118,525	93,6	21,1 ⁽¹²⁾	116,792	94	20,7 ⁽¹⁸⁾	1,5	1,9
Середнє	121,648	90,91	22,28	115,571	94,2	20,43	4,48	7,9

Примітка: 1. Додаток Д.11, рис. Д.11.1 момент часу $t=1144\dots1167$ хв, Додаток Д.14, рис. Д.14.1 момент часу $t=1084\dots1105,3$ хв;

2. Додаток Д.1, рис. Д.1.1 момент часу $t=726,7\dots751,5$ хв, Додаток Д.2, рис. Д.2.1 момент часу $t=704,2\dots724$ хв;

3. Додаток Д.13, рис. Д.13.1 момент часу $t=583,5\dots606,2$ хв, Додаток Д.10, рис. Д.10.1 момент часу $t=717,2\dots738$ хв;

4. Додаток Д.11, рис. Д.11.1 момент часу $t=5,0\dots26,3$ хв, Додаток Д.6, рис. Д.6.1 момент часу $t=70\dots89,8$ хв;

5. Додаток Д.11, рис. Д.11.1 момент часу $t=198\dots218,8$ хв, Додаток Д.8, рис. Д.8.1 момент часу $t=246,2\dots266,4$ хв;

6. Додаток Д.3, рис. Д.3.1 момент часу $t=434\dots455,1$ хв, Додаток Д.4, рис. Д.4.1 момент часу $t=420,1\dots440,8$ хв;

7. Додаток Д.11, рис. Д.11.11 момент часу $t=1144\dots1167$ хв;

8. Додаток Д.1, рис. Д.1.11 момент часу $t=726,7\dots751,5$ хв;

9. Додаток Д.13, рис. Д.13.11 момент часу $t=583,5\dots606,2$ хв;

10. Додаток Д.11, рис. Д.11.11 момент часу $t=5,0\dots26,3$ хв;

11. Додаток Д.11, рис. Д.11.11 момент часу $t=198\dots218,8$ хв;

12. Додаток Д.3, рис. Д.3.11 момент часу $t=434\dots455,1$ хв;

13. Додаток Д.14, рис. Д.14.11 момент часу $t=1084\dots1105,3$ хв;

14. Додаток Д.2, рис. Д.2.11 момент часу $t=704,2\dots724$ хв;

15. Додаток Д.10, рис. Д.10.11 момент часу $t=717,2\dots738$ хв;

16. Додаток Д.6, рис. Д.6.11 момент часу $t=70\dots89,8$ хв;

17. Додаток Д.8, рис. Д.8.11 момент часу $t=246,2\dots266,4$ хв;

18. Додаток Д.4, рис. Д.4.11 момент часу $t=420,1\dots440,8$ хв;

Проаналізувавши результати експериментальних досліджень споживання енергії електричним приводом мішалки (таблиця 5.1) за один цикл підігріву

субстрату з 34°C до 35,8°C за різної температури навколишнього середовища, зроблено висновок, що за використання електричного нагрівального кабелю розміщеному у лопатях двоярусної лопатевої мішалки економія енергії на процес перемішування знаходиться у межах від 0,3% до 21%, а по часу, економія становить від 1,9% до 20,2%, в залежності від температури навколишнього середовища. Споживання енергії на процес перемішування для інших температур навколишнього середовища наведено у графічному вигляді у (Додатку Д).

З метою оцінки підвищення енергоефективності процесу підігріву та перемішування субстрату у біогазовому реакторі за використання електротепломеханічної системи, за результатами безперервних експериментальних досліджень (Додаток Д) було визначено середню кількість вмикань системи підігріву та перемішування субстрату за одну добу ($n \approx 11$). Процес анаеробного зброджування є безперервним та триває 365 днів на рік.

Розрахуємо річну енергетичну ефективність процесу підігріву та перемішування субстрату у біогазовому реакторі за використання електротепломеханічної системи за формулою:

$$E = (D \cdot n \cdot (E_{n1} + E_{o1})) - (D \cdot n \cdot (E_{n2} + E_{o2})), \quad (5.8)$$

де: D – кількість робочих днів біогазового реактора за рік (365 днів); n – середня кількість вмикань підігріву та перемішування субстрату за добу ($n \approx 11$); E_{n1} , E_{o1} – середнє значення витраченої енергії підігрівачем та електричним двигуном, відповідно, на один цикл нагріву субстрату при використанні нагрівального кабелю на стінці реактора $E_{n1} = 371,857$ кДж (Таблиця 4.1), $E_{o1} = 121,648$ кДж (Таблиця 5.1); E_{n2} , E_{o2} – середнє значення витраченої енергії підігрівачем та електричним двигуном, відповідно, на один цикл нагріву субстрату при використанні нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті мішалки $E_{n2} = 323,271$ кДж (Таблиця 4.1), $E_{o2} = 115,571$ кДж (Таблиця 5.1).

$$\begin{aligned} E &= (365 \cdot 11 \cdot (371,857 + 121,648)) - (365 \cdot 11 \cdot (323,271 + 115,571)) = \\ &= 219472 \text{ кДж} = 219,472 \text{ МДж} \end{aligned}$$

При використанні електричного нагрівального кабелю вмонтованого у

лопаті двоярусної лопатевої мішалки у біогазовому реакторі з геометричними параметрами експериментальної установки, економія енергії за рік складає – 18,1% (219,472 МДж), серед яких, 13,1% (195,072 МДж) – електричний підігрів та 5,0% (24,4 МДж) – перемішування субстрату.

Висновки до п'ятого розділу

1. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показали, що використання електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті лопатевої двоярусної мішалки дозволяє зменшити тривалість процесу підігріву субстрату з 34 °С до 35,8 °С, а відповідно і перемішування субстрату, економія по часу 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.

2. 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.

3. 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. Конструкція електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату у біогазовому реакторі, захищено патентами України на винахід та корисну модель.

4. Запропоновано пристрій для визначення об'єму утвореного у біореакторах біогазу, а також визначення у ньому вмісту та концентрації газів. Конструкція пристрою для визначення об'єму утвореного у біореакторах біогазу захищено патентом України на корисну модель.

ВИСНОВКИ

Розв'язано актуальну науково-практичну задачу підвищенні енергетичної ефективності процесів інтенсифікації біогазового виробництва шляхом застосування електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату у біогазових реакторах.

1. Проведений огляд наявних недоліків у системах перемішування та підігріву субстрату показав, що підвищення енергоефективності цих процесів на пряму залежить від вибору раціональних масо-габаритних характеристик систем перемішування та підігріву, варіантів поєднання обох процесів у один об'єкт та забезпечення рівномірного розповсюдження теплових потоків по об'єму субстрату у біогазовому реакторі.

2. Проведений аналіз математичних моделей процесу анаеробного зброджування субстрату показав, що врахування теплових та гідродинамічних характеристик є необхідною умовою для оцінки енергетичної ефективності процесів перемішування та підігріву субстратів у біогазовому реакторі.

3. Розроблено математичну модель з метою визначення енергетичних витрат необхідних для перемішування субстрату у біогазовому реакторі у робочі та пускові моменти руху мішалки. Проведено 3D моделювання з метою 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. Встановлено, що використання двоярусної лопатевої мішалки, у якій по дві лопаті на ярус, котрі встановлені під кутом 45^0 потребує найменшої кількості енергії на перемішування субстрату, та за такого нахилу лопатей забезпечується створення радіальних та осьових потоків. Виявлено закономірність, за якою підвищення частоти обертання зменшує тривалість періоду встановлення усталеного значення робочої потужності. 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 мішалки та теплового потоку від поверхні нагрівального пристрою.

4. Розроблено рівняння теплового балансу біогазового реактора за наявності в ньому, електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву субстрату. На основі розроблених рівнянь встановлено, що втрата тепла у навколишнє середовище для різних об'ємів біогазових реакторів, не залежно від температури навколишнього середовища та наявності або відсутності утеплювального шару має не лінійний характер. Виявлено, що наявність забруднення на стінках реактора створює додаткову перешкоду для проходження тепла, як з реактора у навколишнє середовище так і навпаки. Встановлено, що зі збільшенням частоти обертання електротепломеханічної системи коефіцієнт тепловіддачі та зростання значення теплового потоку мають не лінійний характер, як для нагрівачів із забрудненням поверхні так і без.

5. Розроблено математичну модель витрат енергії на процес термостабілізації об'єму субстрату при підігріві електричним нагрівальним кабелем розміщеним у лопатях мішалки. Використовуючи розроблену математичну модель, визначено кількість енергії необхідної на один цикл підігріву субстрату, його тривалість та отримано графічні залежності зміни температури кожного об'єкту котрий приймає участь у теплообміні. На основі отриманих залежностей зміни температури субстрату та елементів електротепломеханічної системи встановлено, що врівноваження температури об'єктів відбувається не однаково, як за наявності перемішування так і його відсутності. Встановлено, що енергоефективніше використовувати охолодження електротепломеханічної системи підігріву за відсутності перемішування.

6. 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 електричного нагрівального кабелю та датчиків температури розміщених у лопатях мішалки. Синтезовано та виготовлено систему

автоматичної реєстрації показань та керування електротепломеханічною системою. Спроековано та виготовлено пристрій для вимірювання утвореного об'єму біогазу та визначення у ньому вмісту вуглекислого газу та метану. 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 електричним нагрівальним кабелем. Розроблено програму проведення експериментальних досліджень для отримання фактичних результатів динаміки зміни температури субстрату у біогазовому реакторі та величини витраченої енергії на підігрів та перемішування субстрату за використання нагрівального кабелю розміщеного на стінці реактора та за використання нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки, а також порівняння їх з результатами, отриманими теоретичним шляхом, обрано методику обробки масиву зібраних експериментальних даних.

7. Проведено експериментальні дослідження витрати енергії на підігрів та перемішування субстрату у біогазовому реакторі. При початковому нагріві субстрату до температури зброджування видно, що середнє значення температури електричного нагрівального кабелю розміщеного у лопатях двоярусної лопатевої мішалки на 15% більше, а максимальне значення на 12% більше. Час початкового нагріву субстрату до температури зброджування на 5% менший. Система підігріву витрачає на 6,6% менше енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування. При цьому, середнє значення споживаної потужності електричними нагрівачами зменшилось на 1,5%, а електричний двигун перемішуючого пристрою витрачає у 5,3% менше енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування.

8. При дослідженні процесу охолодження субстрату та об'єктів, що знаходяться у біогазовому реакторі, видно, що тривалість охолодження субстрату при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях мішалки на 25,2% більше. Тривалість підтримки максимальної температури на 59,3% більше. Тоді

як, середнє значення температури нагрівального кабелю на 5,4% більше, а мінімальне на 4,5% більше. Охолодження нагрівального кабелю до температури 36,5 °С при його розміщенні у лопатях мішалки відбувається на 85,1% повільніше.

9. За одного циклу термостабілізації субстрату помітно, що середнє значення температури нагрівального кабелю розміщеного у лопатях двоярусної лопатевої мішалки на 9,5% більше, ніж середнє значення температури нагрівального кабелю розміщеного на стінці біогазового реактора. Максимальне значення температури нагрівального кабелю розміщеного у лопатях мішалки на 12% більше, при цьому, досягнення максимального значення температури відбувається на 63,3% швидше. Досягнення максимального значення температури субстрату відбувається на 20,2% швидше. Електричний двигун перемішуючого пристрою витрачає на 21% менше енергії на один цикл перемішування субстрату за температури навколишнього середовища 7 °С, при цьому, тривалість підігріву субстрату до температури 35,8 °С менше на 20,2%.

10. Виявлено, що за використання «раціональної» системи електричного підігріву, за однаковий період експериментальних досліджень (168 годин) 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 використанні «класичної» системи електричного підігріву субстрату.

11. 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%, а 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 підігрів субстрату за використання нагрівального кабелю розміщеного у лопатях електротепломеханічної системи складає $W_2 = 3259872 \text{ Дж}$ кількість витраченої енергії отримана у ході проведення експериментальних досліджень складає $W_2 = 310667 \text{ Дж}$, що на 4,7% менше.

12. Визначено відхилення між теоретичними та експериментальними даними зміни температури субстрату при розміщені нагрівального кабелю на стінці біогазового реактора, за середньою температурою складає 0,3%, а відхилення за значенням максимальної температури 0,1%. Максимальне відхилення становить 0,4%. Теоретично визначене значення кількості витраченої енергії на підігрів субстрату за використання нагрівального кабелю розміщеного на стінці реактора складає $W_1 = 4083072$ Дж, а кількість витраченої енергії отримана у ході експериментальних досліджень складає $W_2 = 426604$ Дж, що на 4,3% більше.

13. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показали, що використання електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті лопатевої двоярусної мішалки дозволяє зменшити тривалість процесу підігріву субстрату з 34 °C до 35,8 °C, а відповідно і перемішування субстрату, економія по часу 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.

14. 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. Конструкція електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату у біогазовому реакторі, захищена патентами України на винахід та корисну модель.

15. Запропоновано пристрій для визначення об'єму утвореного у біореакторах біогазу, а також визначення у ньому вмісту та концентрації газів. Конструкцію пристрою захищено патентом України на корисну модель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сподоба М. О., Заблодський М. М., Радько І. П. Основні складові методології побудови заглибного електромеханічного перетворювача для біогазових комплексів. *V Міжнародна науково-практична конференція присвячена пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК»*, м. Київ, 2019.
2. Zablodskiy M. M., Spodoba M. O. Improvement of the method for determining energy consumption in a biogas reactor. *XII International Conference “Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials” ICEPOM-12, (June 01-05, 2020)*, 311.
3. Zablodskiy M., Spodoba M. Numerical study of energy losses in the environment for mesophilic fermentation regime. *Energy and Automation*, 2020, No 4, P. 97-108.
4. Заблодський М. М., Сподоба М. О. Обґрунтування створення електротепломеханічної системи перемішування та підігріву біомаси. Київ : *Енергетика та автоматика*, 0(5), 2020, 136-148 с.
5. Заблодський М. М., Сподоба М. О. Обґрунтування створення електротепломеханічної системи перемішування та підігріву біомаси. *Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми сучасної теплоенергетики» присвячена 100-річчю професора Бориса Харлампієвича Драганова (10-11 грудня 2020 р.)*. Київ. НУБіП України.
6. Zablodskiy M., Spodoba M. Mathematical Model Of Thermal Processes During The Fermentation Of Biomass In A Biogas Reactor. *In 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkov : IEEE, 2020. P. 227-231.
7. Заблодський М. М., Сподоба М. О. Визначення енергетично ефективного рівня швидкості перемішувального органу електромеханічної системи. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Випуск 4(52). Кременчук, 2020. 17-26 с.

8. Сподоба М. О., Заблодський М. М. Залежність енергетичних витрат від типу використаної механічної мішалки у біогазовому реакторі. *Електротехніка та електроенергетика*. Випуск 1. Запоріжжя, 2021. 26-33 с.
9. M. Zablodskiy, M. Spodoba. Dynamic Analysis of Energy Consumption During Substrate Fermentation in a Biogas Reactor. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2021, P. 147-152.
10. Заблодський М. М., Сподоба М. О., Сподоба О. О. Біогазовий реактор: патент на корисну модель №145242 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 101/00. и 202004181; заявл. 08.07.2020; опубл. 25.11.2020, Бюл.№ 22. 5 с.
11. Заблодський М. М., Сподоба М. О., Сподоба О. О. Пристрій для визначення об'єму утвореного у біогазових реакторах біогазу: патент на корисну модель №147391 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 101/00. и 202007103; заявл. 05.11.2020; опубл. 05.05.2021, Бюл.№ 18. 5 с.
12. Заблодський М. М., Сподоба М. О., Сподоба О. О. Біогазовий реактор: патент на винахід №126250 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 3/28. а 202004191; заявл. 08.07.2020; опубл. 07.09.2022, Бюл.№ 36. 5 с.
13. Заблодський М. М., Сподоба М. О. Безперервна реєстрація даних при експериментальних дослідженнях електротепломеханічної системи біогазового реактора. *XXIII Міжнародна наукова конференція "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвячена 122-річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, (16-18 жовтня, 2022 р.)*, м. Київ – Житомир.
14. Zablodskiy M. M., Spodoba M. O. Power supply of measuring sensors when performing experimental studies of electrical thermal mechanical system. *Energy and Automation*, 0(4), Kyiv, 39-48.
15. Заблодський М. М., Шворов С. А., Клендій П. Б., Андрієвський А. П., Ковальчук С. І., Сподоба М. О. Інноваційна система переробки побічних продуктів птахівництва з впливом електромагнітного поля і автономним енергозабезпеченням. *6-й Міжнародний конгрес "Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування"*: збірник матеріалів. – Львів: Західно-Український

Консалтинг Центр (ЗУКЦ), ТзОВ, 2020

16. Заблодский Н. Н., Сподоба М. А., Сподоба А. А. Экспериментальное исследование затрат энергии на процесс первоначального нагрева субстрата до температуры брожения. *Problemele energeticii regionale*, 1 (53), Молдова, 2022, 83-96 с.
17. Заблодський М. М., Сподоба М. О., Сподоба О. О. Експериментальне дослідження витрати енергії на процес початкового нагріву субстрату за використання електротепломеханічної системи. *Electrical Engineering and Power Engineering*, (1), 2022, 49–59 с.
18. Заблодський М. М., Сподоба М. О., Сподоба О. О. Експериментальне дослідження енергетичних втрат біогазового реактора в навколишнє середовище при мезофільному режимі зброджування. *Енергетика і автоматика*, 0(2), 2022, 18-32 с.
19. Заблодський М. М., Сподоба М. О. Методика проведення експериментальних досліджень біогазового реактора з заглибною комбінованою системою перемішування та електричного підігріву. *Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)»*, Київ, 19-22 травня 2020.
20. Zablodskiy M., Kozyrskiy V., Zhyltsov A., Savchenko V., Sinyavsky O., Spodoba M., Klendiy P. and Klendiy G. "Electrochemical Characteristics of the Substrate based on Animal Excrement During Methanogenesis With the Influence of a Magnetic Field". In *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2020, IEEE. – pp. 530-535.
21. Zablodskiy M., Spodoba M. "Comparison of Theoretical and Experimental Data of Energy Consumption when Heating the Substrate in a Biogas Reactor". In *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, 2022, IEEE. – pp. 01-04.
22. Сподоба М. О., Заблодський М. М. Енергоефективність електроприводу змішуючого пристрою біогазового реактора. *Електроенергетика*,

електромеханіка та технології в АПК: Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 22 грудня 2022 р. Держ. біотехнологічний ун-т. – Харків : 2022. – 70-71 с.

23. Сподоба М. О., Заблудський М. М. Перспективи використання біогазових технологій для утилізації органічних відходів. *Екологічно сталий розвиток урбосистем: Матеріали всеукр. наук.-практ. інтернет-конф., Харків, 2–3 листопада 2022 р. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 111 с.*

24. Vimmerstedt L., Brian J., Bush W., Hsu D. D., Inman D., Peterson S. O. Maturation of biomass-to-biofuels conversion technology pathways for rapid expansion of biofuels production: a system dynamics perspective. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 2015. Vol. 9. P. 158–176.

25. Medipally S. R., Yusoff F. Md., Banerjee S., Shariff M. Microalgae as Sustainable Renewable Energy Feedstock for Biofuel Production. *BioMed Research International.* 2015. Vol. 22. P. 1–13.

26. Zulauf C., Prutska O., Kirieieva E., Pryshliak N. Assessment of the potential for a biofuels industry in Ukraine. *Problems and Perspectives in Management.* 2018. Vol. 16(4). P. 83–90.

27. Grando R. L. Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2017. Vol. 80. P. 44–53.

28. Lohan S. K. Biogas: A boon for sustainable energy development in India's cold climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2015. Vol. 43. P. 95–101.

29. Azeem Hafiz P. A., Rashid A. R., Muhamed S. A., Sharukh M. Study of Biogas as a Sustainable Energy Source in India. *International Journal of Research in Mechanical Engineering.* 2016. Vol. 4. Issue 3, P. 58–62.

30. Shivika M., Ahlgren E. O., Shukla P. R. Barriers to biogas dissemination in India: A review. *Energy Policy.* 2018. Vol. 112. P. 361–370.

31. Balussou D., McKenna R., Möst D., Fichtner W. A model-based analysis of the future capacity expansion for German biogas plants under different legal frameworks. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018. Vol. 96. P. 119–131.

32. Гаценко К. В., Волошин М. Д. Технологія отримання біогазу на основі

харчових відходів. Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. Технічні науки. 2019. Вип. 1. С. 131-136.

33. Куріс Ю. В. Метаногенез і технологічні схеми отримання біогазу. Харків : Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит. 2011. №10 (92). С. 41-48.

34. Охота Ю. В., Козак К. В. Основні тенденції ефективного використання біогазу в Україні. Дніпро : Ефективна економіка. 2018. № 4.

35. Панчук М. В., Шлапак Л. С. Аналіз перспектив розвитку виробництва та використання біогазу в Україні. Івано-Франківськ : Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2016. № 3(60). С. 26-33.

36. Токарчук Д. М., Яремчук О. В. Виробництво і використання біогазу в Україні: економічні і соціальні перспективи. Збірник наукових праць Таврійського державного агротехнологічного університету (економічні науки). Мелітополь : 2013. № 2(3). С. 338-346.

37. Трипольська Г. С., Дячук О. А., Подолець Р. З., Чепелев М. Г. Біогазові проекти в Україні: перспективи, наслідки та регуляторна політика. Київ : Економіка і прогнозування. 2018. № 2. С. 111-134.

38. Четверик Г. О. Енергоефективне перетворення рідких відходів газифікації біомаси в біогазовій установці : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.08. Київ, 2018. 166 с.

39. Кучерук П. П., Матвеев Ю. Б., Ходаківська Т. В., Грабовський М. Б. Перспективи виробництва біогазу з сумішей гнойових відходів тваринництва та рослинної сировини в Україні. Київ : Промислова теплотехніка. 2013. №1 (35). С. 107-113.

40. Пришляк Н. Виробництво біогазу в індивідуальних біогазових установках: досвід Індії та перспективи для України. *Agricultural and resource economics: international scientific e journal*. 2019. Vol. 5, № 1. С. 122-136.

41. Гелетука Г. Г., Кучерук П. П., Матвеев Ю. Б. Перспективи виробництва та використання біометану в Україні. Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України. 2014. № 11. 42 с.

42. Заблодський М. М., Клендій П. Б., Клендій Г. Я., Дудар О. П.

Інтенсифікація виробництва біогазу впливом електромагнітного поля та ультразвуку. Київ : Енергетика і автоматика. 2018. №1. С. 13-23.

43. Гелету́ха Г. Г., Желе́зна Т. А., Баштовий А. І. Створення конкурентного ринку біопалив в Україні. Частина 1. Теплофізика та теплоенергетика. 2017. Т. 39. № 3. С. 85–90.

44. Bilotskiy S., Danylova O., Grinenko O., Karmaza O., Koucherets D. Legal and economic aspects of Ukrainian enterprises activity at the European renewable energy market. *Investment Management and Financial Innovations*. 2017. Vol. 14(2). Pp. 71–78.

45. Тока́рчук Д. М. Інвестиційне забезпечення виробництва біогазу сільськогосподарськими підприємствами України. Вінниця : Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2016. № 12. С. 26–35.

46. Кли́мчук О. В. Економіко-технологічні процеси ефективного регіонального виробництва біогазу в Україні. Вінниця : Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2017. № 2. С. 104–113.

47. Куче́рук П. П. Биогазовые установки в сельском хозяйстве и на станциях очистки сточных вод. Київ : ИТТФ НАНУ, 2009. 25 с.

48. Kaletnik G. Production and use of biofuels: Second edition, supplemented. Vinnytsia: Nilan-Ltd, 2018. 336 p.

49. Скле́яр О. Г., Скле́яр Р. В. Методи інтенсифікації процесів метанового зброджування. Мелітополь : Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2014. Вип 4, Т. 1. С. 3–9.

50. Ghimire P. C. SNV supported domestic biogas programmes in Asia and Africa. *Renew. Energy*, 2013. Vol. 49, P. 90–94.

51. Gabisaa E. W., Gheewala S. H. Potential, environmental, and socio-economic assessment of biogas production in Ethiopia: The case of Amhara regional stat. *Biomass Bioenergy*. 2019. Vol. 122. P. 446–456.

52. Song Z., Zhang C., Yang G., Feng Y., Ren G., Han X. Comparison of biogas development from households and medium and large-scale biogas plants in rural China. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, Vol. 33. P. 204–213.

53. Chen L., Zhao L., Ren C., Wang F. The progress and prospects of rural biogas production in China. *Energy Policy*. 2012. Vol. 51. P. 58–63.
54. Gao Y., Kuang Z., Pan M., Huang X., Che N. W., Ye M., Xu Z., Zhang M., Xiao G. Development progress and current situation analysis of the rural household biogas in China. *Guangdong Agric. Sci*. 2006. Vol. 11. P. 22–27.
55. EBA. EBA Statistical Report 2018; European Biogas Association : Brussels, Belgium, 2019.
56. WBA. Global Potential of Biogas; World Biogas Association : London, UK, 2019.
57. Abbasi T., Tauseef S. M., Abbasi S. A. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation — An overview. *Renew. Sustain. Energy Rev*. 2012. Vol. 16. P. 3228–3242.
58. Albertson M. L., Pruden A., Oliver R. T. Enhanced anaerobic digestion of biomass waste for optimized production of renewable energy and solids for compost. *Int. Congr. Sci*, 2006. Vol. 1293. P. 221–229.
59. Tong Z., Yang Y., Xie D. Insights into the production potential and trends of China's rural biogas. *Int. J. Energy Res*, 2015. Vol. 39. P. 227–237.
60. Калетнік Г. М., Здирко Н. Г., Фабіянська В. Ю. Біогаз в домогосподарствах – запорука енергонезалежності сільських територій України. Вінниця : Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики, 2018. № 8. С. 7-22.
61. Wei S. Z., Zhang H. F., Cai X. B., Xu J., Fang J. P., Liu H. M. Psychrophilic anaerobic co-digestion of highland barley straw with two animal manures at high altitude for enhancing biogas production. *Energy Convers. Manag*, 2014. Vol. 88. P. 40–48.
62. Nasir I. M., Mohd Ghazi T. I. M., Omar R. Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: A review. *Eng. Life Sci*, 2012. Vol. 12. P. 258–269.
63. Hashimoto A. G. Methane from cattle waste. *Biotechnologie & Bioengineering*. 1982. Vol. 24, № 9. P. 2039–2052.

64. Семененко И. В. Проектирование биогазовых установок. Сумы : ПФ «МакДен», ИПП «Мрія-1» ЛТД, 1996. 347 с.
65. Сотник І. М. Еколого-економічні механізми мотивації ресурсозбереження. Монографія. Суми : ВВП «Мрія» ТОВ, 2008. 330 с.
66. Єлізаров О. І., Лисенко О. І., Отримання біогазу з опалого листя. Кременчук : Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського, 2013. Вип.81, №4. с. 166-169.
67. Попик О. В. Еколого-економічні аспекти поводження з опалим листям на урбанізованих територіях. Економічні інновації: Зб. наук. пр. Одеса : ППРЕД НАН України, 2014. Вип. 58. С. 266-272.
68. Запорожець О. І., Савченко В. І., Карабцов Г. П., Соловейкіна А. К. Паливо з біомаси на основі опалого листя. Київ : Вісник національного авіаційного університету, 2010. № 1. С. 185-190
69. Д'яконов В. І., Скрипник О. С., Д'яконов О. В. Особливості функціонування гнучких технологій переробки рослинних та деревинних відходів. Будівництво, матеріалознавство, машино-будівництво: зб. наук. робіт. Дніпропетрівськ : ПГАСА, 2015. Вип. 83. С.113-117.
70. Д'яконов В. І. Скрипник О. С., Д'яконов О. В. Утилізація рослинних і деревних відходів паркової зони міста. Харків : Комунальне господарство міст : Наук.-техн. зб. ХНУМГ ім. А. Бекетова, 2015. Вип. 124. С. 49-52.
71. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В., Анохіна К. В. Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання. Вінниця : ВНТУ, 2010. – 170 с.
72. Дубровін В. О., Корчемний М. О., Масло І. П., Шептицький О., Рожковський А., Пасторек З., Гжибек А., Євич П., Амон Т., Криворучко В. В. Біопалива (технології, машини і обладнання). Київ : ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004. 137 с.
73. Куценко Ю. М. Аналіз основних чинників анаеробного метанового збродження для отримання біогазу. Мелітополь : Праці ТДАТУ. 2011. Вип. 11, № 3. С. 49–56.
74. Поліщук В. М. Вплив режимів метанового бродіння на ефективність

виробництва біогазу. Київ : Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування: зб. наук. праць, 2013, № 185. Ч. 3. С. 180-191.

75. Шацький В. В., Скляр О. Г., Скляр Р. В., Солодка О. О. Вплив структури субстрату на вихід біогазу при метановому зброджуванні. Мелітополь : Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. ТДАТУ, 2013. Вип. 13. Т. 3. С. 3-12.

76. Голуб Г. А., Дубровін В. О., Поліщук В. М., Сєра К. М., Драгнєв С. В., Марус О. А., Сидорчук О. В., Павленко М. Ю., Чуба В. В., Кухарець С. М. Біогаз: навч. посіб. Київ : ЮНІДО, 2015. 48 с.

77. Хажмурадов М. А. Установка та технологія по утилізації біогазу. Київ : Наука та інновації. 2006, № 4. С. 19.

78. Deublein D., Steinhauser A. Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008. 450 p.

79. Teleszewski T. J., Zukowski M. Analysis of Heat Loss of a Biogas Anaerobic Digester in Weather Conditions in Poland. Journal of Ecological Engineering, 2018, Vol. 19(4), P. 242–250.

80. Барбара Э., Хайнц Ш. Биогазовые установки. Практическое пособие: пер. с нем. выполнен компанией Zorg Biogas, под науч. ред. И. А. Реддих.: Zorg Biogas, 2011. 268 с.

81. Чеботарева О. В., Сербин В. А., Колосова Н. В. Особенности теплообмена в метантенке при сбраживании неперемешиваемой биомассы. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Вип. 2(94). Інженерні системи та техногенна безпека, 2012. С. 42–48.

82. Yu L., Ma J., Chen S. Numerical simulation of mechanical mixing in high solid anaerobic digester. Bioresour. Technol. 2011, Vol. 102. P. 1012–1018.

83. Yang H., Deng L., Liu Y., Pu X., Zhang G., Lei, S., Shi G. A review on effects of stirring on biogas production of anaerobic digestion. China Biogas, 2010, Vol. 28, P. 3–9.

84. Latha K., Velraj R., Shanmugam P., Sivanesan S. Mixing strategies of high solids anaerobic co-digestion using food waste with sewage sludge for enhanced biogas

production. *J. Clean. Prod.* 2019, Vol. 210. P. 388–400.

85. Куріс Ю. В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органомісних енергоресурсів: монографія. Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 348 с.

86. Kobayashi T., Wu Y., Xu K., Yu Y. Effect of mixing driven by siphon flow: Parallel experiments using the anaerobic reactors with different mixing modes. *Energies*, 2013, Vol. 6. P. 4207–4222.

87. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Аналіз способів та засобів для перемішування субстрату в метантенках біогазових установок. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. 2019, Vol. 10, No 4, P. 19-26

88. Skliar A. G., Skliar R. V. Analysis of methods of determination of residence time and load on methane tank. *Bulletin of KhNTUSG them. P. Vasilenko*. Kharkov. 2014, Vol. 148, P. 405-412.

89. Skliar A. G., Skliar R. V. Analysis of designs of biogas plants with vibration intensification of anaerobic fermentation process. *Proceedings of the Tavrida State Agrotechnological University*. Melitopol : TSATU. 2014, Vol. 14. No 3, P. 196-203.

90. Skliar A. G., Skliar R. V. Methods of intensification of methane digestion processes. *TSATU Scientific Bulletin*. Melitopol. 2014, Vol. 4. No.1, P. 3-9

91. Закоморний Д. М., Поводзинський В. М., Шибецький В. Ю. Класифікація та аналіз роботи ферментерів з механічними перемішуючими пристроями в аеробних процесах біотехнології. *ScienceRise*, 2015, Вип. 5, №2, с. 24-32.

92. Червоний І. Ф., Куріс Ю. В. Дослідження пристроїв та удосконалення процесів перемішування в біогазових установках. Харків : Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, 2012, Вип. 96, №2.

93. Elnekave G., Tufekci N., Kimchie S., Fresen Shelef G. Tracing the mixing efficiency of a primary mesophilic anaerobic digester in a municipal wastewater treatment plant. *Environ. Bull*, 2006, No 15. P.1098–1105.

94. Bello-Mendoza R., Sharratt P. N. Compartment mixing model for

anaerobic digesters with central draft-tubes. Inst. Chem. Eng. Symp. Ser, 1999. No 146. P. 383–394.

95. Borole A. P., Klasson T., Ridenour W., Holland J., Karim K., Al-Dahhan M. H. Methane production in a 100-L upflow bioreactor by anaerobic digestion of farm waste. Appl. Biochem. Biotechnol. 2006, No 131. P. 887–896.

96. Karim K., Hoffmann R., Klasson T., Al-Dahhan M. H. Anaerobic digestion of animal waste: waste strength versus impact of mixing. Bioresour. Technol. 2005, No 96. P. 1771–1781.

97. Kalia A. K., Singh S. P. Effect of mixing digested slurry on the rate of biogas production from dairy manure in batch fermenter. Energy Sources. 2001, No 23. P. 711–715.

98. Brade C. E., Noone G. P. Anaerobic sludge digestion – need it be expensive. Making more of existing resource. Water Pollut. Control. 1981, No 80. P.70–94.

99. Luo H., Al-Dahhan M. H. Macro-Mixing in a draft tube airlift bioreactor. Chem. Eng. Sci. 2008. Vol. 6, No 63. P.1572-1585.

100. Foukrach M., Bouzit M., Ameer H. Effect of Agitator's Types on the Hydrodynamic Flow in an Agitated Tank. Chin. J. Mech. Eng. 2020, Vol. 33, P. 37.

101. Луняка К. В., Вус Д. Н., Русанов С. А., Ключев О. І. Розчинення твердої речовини при перемішуванні мішалками в посудинах з вертикальними перегородками. Херсон : «Теорія і практика сучасного природознавства», Т. 33. Збірник наукових праць. 2009. С. 36-39.

102. Trad Z., Fontaine J., Larroche C., Vial C. Multiscale mixing analysis and modeling of biohydrogen production by dark fermentation. Renew. Energy. 2016. Vol. 98. P. 264–282.

103. Ameer H. Mixing of complex fluids with flat and pitched bladed impellers: effect of blade attack angle and shear-thinning behavior. Food Bioprod. Process. 2016. Vol. 99. P. 71-77.

104. Ameer H. Modifications in the Rushton turbine for mixing viscoplastic fluids. J. Food Eng. 2018, Vol. 223. P. 117-125.

105. Scarlat N., Dallemand J.-F., Fahl F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renew. Energy* 2018, Vol. 129. P. 457–472.

106. Луняка К., Вус Д., Чумаков Г. Дослідження масопередачі при перемішуванні турбінною мішалкою в посудинах з відбивними перегородками. Тернопіль : Вісник Тернопільського державного технічного університету, том 13. №1. 2008. С. 171-176.

107. Ратушняк Г. С., Анохіна К. В., Джеджула В. В. Біогазовий реактор: патент на корисну модель №31173 Україна, МПК C02F 11/04. u200714164; заявл. 17.12.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. №6. 2 с.

108. Жадан С. О., Шаповалов Е. Б., Салюк А. І., Шаповалов В. Б. Біогазовий реактор на основі шнекового конвеєра: патент на корисну модель №107120 України, МПК C05F 3/00. u201510842; завл. 06.11.2015; опубл. 25.05.2016; Бюл. № 10. 4 с.

109. Ward A. J., Hobbs P. J., Holliman P. J., Jones D. L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour. Technol.* 2008, Vol. 99. P. 7928–7940.

110. Janczak D., Mazurkiewicz J., Czekala W., Myszura M., Kozłowski K., Jezowska A. A Possibility of Functioning Biogas Plant at a Poultry Farm. *Journal of Ecological Engineering*, 2019, Vol.20, No 11. P. 225-231.

111. Pham C. H., Vu C. C., Sommer S. G., Bruun S. Factors Affecting Process Temperature and Biogas Production in Small-scale Rural Biogas Digesters in Winter in Northern Vietnam. 2014, Vol.27, No 7. P. 1050–1056.

112. Golub N., Kozlovets O. Technology of anaerobic-aerobic purification of wastewater from nitrogen compounds after obtaining biogas. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2016. Vol. 10. No 3. P. 35 – 40.

113. Ратушняк Г. С., Анохіна К. В., Джеджула В. В. Біогазовий реактор: патент на корисну модель №34016 Україна, МПК C02F 11/04. u200801976; заявл. 18.02.2008; опубл. 25.07.2008, Бюл. №14. 2 с.

114. Kou W., Zheng L., Qu J., Shao L., Zhang D. Engineering design of solar and power waste energy heating system for biogas project. *Trans. Chin. Soc. Agric.*

Eng. 2013, Vol. 29. P. 211–217.

115. Chervinsky L., Usenko S., Spodoba M. Researching of the tesla's bifilar coils, as a sources of electrical energy. Korean Journal of Food & Health Convergence, Vol. 5, No 4, 2019. P.17-21.

116. Marks S., Dach J., Fernandez Morales F. J., Mazurkiewicz J., Pochwatka P., Gierz Ł. New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland. Journal of Ecological Engineering, 2020, Vol. 21, No 4. P. 19-25.

117. Marks S., Jeżowska A., Kozłowski K., Dach J., Wilk B., Fudala-Książek S. Review of mixing systems of fermentation liquid used in biogas plants. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna, 2017, Vol. 6. P. 24–26.

118. Feng R., Li J., Dong T., Li X. Performance of a novel household solar heating thermostatic biogas system. Appl. Therm. Eng. 2016, Vol. 96. P. 519–526.

119. Тахтуев Б. Г. Переработка отходов картонно-бумажных производств. Тез. докл. 2-й Междунар. конф. «Сотрудничество для решения проблемы отходов»: 9-10 февраля 2005 г., г. Харьков. Харьков : ИД «ИНЖЭК», 2005. С. 392.

120. Семінський О. О., Мазепа Ю. В. Дослідна установка для одержання біогазу з відходів целюлозно-паперового виробництва. VI Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» : тези доп. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. С. 96.

121. Zhen G., Lu X., Kobayashi T., Li Y., Xu K. Mesophilic anaerobic co-digestion of waste activated sludge and *Egeria densa*: Performance assessment and kinetic analysis. Appl. Energy 2015, Vol. 148. P. 78–86.

122. Rashed M. B. The Effect of Temperature on the biogas Production from Olive Pomace. University Bulletin, ISSUE. 2014. Vol. 3, No 16. P. 135-148.

123. Sibiya Noxolo T., Muzenda E., Tesfagiorgis H. B. Effect of Temperature and pH on The Anaerobic Digestion of Grass Silage. Sixth International Confrence on Green Technology, Renewable Energy and Enviromental Engineering. Cape Town. South Africa. 2014. P. 198-201.

124. Ратушняк Г. С., Власенко А. М., Анохіна К. В., Каташинський В. О. Біогазовий реактор: патент на корисну модель № 103681 України, u201506246;

заявл. 24.06.2015; опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24. 4 с.

125. Buswell A. M., Mueller H. F. Mechanism of methane fermentation. *Industriell and Engineering Chemistry*. 1952. №3. P.550-552.

126. Hill D. T. A Comprehensive Dynamic Model for Animal Waste Methanogenesis. *Transactions of the ASAE*. 1982. P. 1374 – 1380.

127. Hill D. T. Simplified Monod Kinetics of Methane Fermentation of Animal Wastes. *Agricultural Wastes*. 1989. Vol. 5. P. 1 – 16.

128. Safely L. M., Westerman P. W. Low temperature digestion of dairy and swine manure. *Biores. Technol*. 1994. №47. P. 165–171.

129. Toprak H. Temperature and organic loading dependency of methane and carbon dioxide emission rates of a full-scale anaerobic waste stabilization pond. *Water Research*. 1995. №29. P. 1111-1119.

130. Vartak D. R., Engler C. R., Ricke S. C., Mcfarland M. J. Low temperature anaerobic digestion response to organic loading rate and bioaugmentation. *Journal of Environmental Science and Health*. 1999. Vol.34, No 3. P. 567-583.

131. Masse D. I., Droste R. L. Comprehensive model of anaerobic digestion of swine manure slurry in a sequencing batch reactor. *Waste Research*. 2000. №34. P. 3087-3106.

132. Chen Y. R., Hashimoto A. G. Kinetics of Methane Fermentation. *Biotechnology and Bioengineering Symposium*. 1978. №8. P. 269 – 282.

133. Contois D. E. Kinetics of bacterial growth: Relationship between population density and specific growth rate of continuous cultures. *Journal of General Microbiology*. 1959. №21. P.40-50.

134. Кухарець С. М. Динаміка руху складових субстрату в обертових реакторах. Житомир : Вісник ЖНАЕУ, Вип. 53, №1, Т.1. 2016. 249 – 258 с.

135. Ткаченко С. Й., Пішеніна Н. В. Математичне моделювання робочих процесів в біогазовій установці. Вісник Вінницького політехнічного інституту, вип. 3, 2011, с. 41-47.

136. Ткаченко С. Й., Степанов Д.В. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки : монографія. —

Вінниця: Універсум–Вінниця, 2004. 132 с.

137. Ткаченко С. Й., Резидент Н. В. Тепловіддача до багатокомпонентного середовища в умовах вимушеної і природної конвекції. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2006. № 1. 111—114 с.

138. Ткаченко С. Й., Резидент Н. В. Нові аспекти застосування теорії подібності в теплотехнічних розрахунках систем біоконверсії. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Енергетика та електротехніка. 2007. № 1.

139. Fleming J. G. Novel simulation of anaerobic digestion using computational fluid dynamics. Department of Mechanical Engineering North Carolina State University. 2002.

140. Gebremedhin K. D., Wu B., Gooch C., Wright P., Inglis S. Heat transfer model for plug-flow anaerobic digesters. Transaction of the ASABE. 2005. №48. P. 777-785.

141. Wu B., Bibeau E. L. Development of 3-D anaerobic digester heat transfer model for cold weather applications. Transactions of the ASABE, 2006. P. 749-757.

142. Wu B., Chen S. CFD simulation of non-Newtonian fluid flow in anaerobic digesters. Biotechnol Bioeng. 2008. №99. P. 700-711.

143. Maier C., Weichselbaum W., Schlerka M., Harasek M. Development of Agitation Systems in Biogas Plants: Investigation of Mixing Characteristics, Improvement of Energy Efficiency and Scale-up using CFD. Chemical Engineering Transactions. 2010. №21. P. 1195–1200.

144. Kamarad L., Pohn S., Bochmann G., Harasek M. Determination of mixing quality in biogas plant digesters using tracer tests and computational fluid dynamics. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2013. №140. P. 1269–1278.

145. Mandrea L., Baran G., Cananau S., Babutanu C. A. The suspensions dynamics in biogas reactors. U.P.B. Sci. Bull., Series D. 2001. №73. P. 121–130.

146. Vesvikar M. S., Al-Dahhan M. H. Flow pattern visualization in a mimic anaerobic digester using CFD. Biotechnology and Bioengineering. 2005. №89. P. 719-

732.

147. Mehul S., Borole A., Klasson T., Karim K., Al-Dahhan M. H., Vesvikar M. Performance study of a pilot scale anaerobic digester and comparison with laboratory scale units. *Bioresource Technology*. 2005. №45. P.56-64.

148. Hoffman R., Varma R., Vesvikar M., Karim K., Al-Dahhan M. H. Effect of shear rate on hydrodynamics, performance, and microbial community dynamics for an anaerobic digester treating cow waste. *Angenent Anaerobic Digestion*. 2004. №3. P. 1755.

149. Karim K., Varma R., Vesvikar M., Al-Dahhan M. H. Flow pattern visualization of a simulated digester. *Water Research*. 2004. №38(17). P. 3659-3670.

150. Latha S., Borman D., Sleigh P. A. CFD multiphase modelling for evaluation of gas mixing in an anaerobic digester. 14th European Biosolids and Organic Resources Conference and Exhibition 9-11 th November 2009.

151. Mendoza A. M., Martinez T. M., Montanana V. F. Modeling flow inside an anaerobic digester by CFD techniques. *IJEE*. 2011. № 6. P. 963-974.

152. Chmielewski A. G., Berbec A., Zalewski M., Dobrowolski A. Hydraulic mixing modeling in reactor for biogas production. *Chemical and Process Engineering*. 2012. №33 (4). P. 621-628.

153. Terashima M., Goel R., Komatsu K., Yasui H., Takahashi H., Li Y. Y., Noike T. CFD simulation of mixing in anaerobic digesters. *Bioresource Technology*. 2009. №100. P. 2228–2233.

154. Porteiro E., Míguez J. L., Granada E., Moran J. C. Mathematical modeling of the combustion of a single wood particie. *Fuel Processing Technology*. Vol. 87, 2006. P. 169-175.

155. Ратушняк Г. С. Автоматичне управління в системах біоконверсії. Вінниця : Вісник ВПІ. 2006. № 6. С. 116 –121.

156. Thunman H. Combustion of wood particles – a particie model for Eulerian calculations. *Combustion and Flame*. Vol. 129, 2002. P. 30-46.

157. Spielberg, S., Gopaluni, R. B., Loewen, P. D. Deep reinforcement learning approaches for process control. In 6 th International Symposium on Advanced Control

of Industrial Processes (AdCONIP), 2017. P. 201-206.

158. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Andrei A. Rusu, Veness J., Marc G. Bellemare, Hassabis D. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540), 2015. P. 529-533.

159. Timothy P. Lillicrap, Jonathan J. Hunt, Pritzel A., Heess N., Erez T., Tassa Y. Daan Wierstra. Continuous control with deep reinforcement learning. 2015, P.14.

160. Russell S. J., Norvig P. Artificial intelligence: a modern approach, global edition. Harlow, United Kingdom. 2021. P. 1170

161. David S., Lever G., Heess N., Degris T., Wierstra D., Riedmiller M. Deterministic policy gradient algorithms. In *Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning*. Beijing, China, 2014. JMLR : W&CP, volume 32.

162. Ghavamzadeh M., Mannor S., Pineau J., Tamar A. Bayesian reinforcement learning: A survey. *Foundations and Trends in Machine Learning*, 8(5-6), 2015. P. 359-483.

163. Yesilevskiy V., Dyadun S., Kuznetsov V. LSTM networks for anaerobic digester control. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2019, Vol. 5. P. 130-136.

164. Shvorov S., Polishchuk V., Pasichnyk N., Tsigulov I., Davidenko T., Volochay S.. Intelligent process control system for monitoring, collection and processing of biomass for production of biomethane and high-quality fertilizers. *Energy and automation*. 2021. №1. P. 50-60.

165. Гелету́ха Г. Г., Блюм Я. Б. Новітні технології біоконверсії: монографія. Київ : Аграр Медіа Груп, 2010. 326 с.

166. Юркова В. В., Шкляр В. И., Дубровская В. В. Аналіз енергоефективності роботи когенераційних установок на біопаливі. Київ : Науковий журнал Київського політехнічного університету ім. Ігоря Сікорського «Енергетика, економіка, технології, екологія», 2014. №3. 29-32 с.

167. Мазема Ю. В., Семінський А. А. Вплив температури на утворення біогазу із відходів целюлозно-паперового виробництва. *Вістник ІХФ*. 2011. №1(7).

168. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових

виробництв: підручник, 2-е видання, доп. та випр. Харків : Світ Книг, 2014. 495 с.

169. Ратушняк Г. С., Лялюк О. Г., Кощєєв І. А. Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії термостабілізації процесу ферментації біомаси: монографія. Вінниця : ВНТУ, 2017. 88 с.

170. Луняка К. В., Вус Д. Н., Ключев О. І., Николаенко І. В. Получение зависимости для расчета времени растворения твердого вещества механической мешалкой. Суми : Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. 2009. №3. С. 191-195.

171. Гільчук В. В., Халатов А. А. Теорія теплопровідності. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського. Україна, Київ. 2017. 86 с.

172. Коваленко В. Л. Електрофізичні методи підвищення ефективності біогазових технологій. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.08 – Перетворювання відновлюваних видів енергії – Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Київ, 2020.

173. Мрачковський А. М., Лут М. Т., Березюк А. О. Апарати керування та захисту. Методичні вказівки щодо виконання курсового проекту «Розрахунки та вибір пускозахисних апаратів для асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором». Київ : Видавництво «ЦП Компрінт», 2014. 124 с.

174. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

175. Роянов О. М. Пожежна безпека виробництв. – Харків : НУЦЗУ, 2016. 374 с.

176. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні.

177. OHSAS 18001:2007 «Occupational health and safety management systems – Requirements» – міжнародний стандарт системи менеджменту гігієни і безпеки праці.

178. A. McKay, R. Franklin. Fire and explosion hazards with thermal fluid systems. Loss Prevention, vol. 13, № 219, 2011.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Zablodskiy M., **Spodoba M.** Numerical study of energy losses in the environment for mesophilic fermentation regime. Energy and Automation. 2020. № 4. P. 97–108. *(Здобувачем проведено дослідження для визначення необхідної кількості енергії на поновлення величини теплових втрат у навколишнє середовище, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

2. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.** Обґрунтування створення електротепломеханічної системи перемішування та підігріву біомаси. Енергетика та автоматика. 2020. № 5. С. 136–148. *(Здобувачем проведено дослідження зміни теплового потоку від частоти обертання робочого органу електротепломеханічної системи, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

3. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.** Визначення енергетично ефективного рівня швидкості перемішувального органу електромеханічної системи. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2020. Вип. 4. № 52. С. 17–26. *(Здобувачем проведено 3D моделювання та визначено вектори розповсюдження потоків біомаси в залежності від швидкості обертання лопатевої двоярусної мішалки, визначено енергетично ефективний рівень швидкості перемішувального органу електротепломеханічної системи, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

4. **Сподоба М. О.,** Заблодський М. М. Залежність енергетичних витрат від типу використаної механічної мішалки у біогазовому реакторі. Електротехніка та електроенергетика. 2021. Вип. 1. С. 26–33. *(Здобувачем проведено дослідження залежності енергетичних витрат механічних мішалок, визначено енергоефективний тип перемішуючого пристрою для підвищення енергетичної ефективності процесу перемішування субстрату у біогазовому реакторі, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

5. Zablodskiy M. M., **Spodoba M. O.** Power supply of measuring sensors when performing experimental studies of electrical thermal mechanical system. Energy and Automation. 2021. № 4. P. 39–48. *(Здобувачем проведено експериментальне дослідження коливання вихідної напруги блоків живлення для контрольно-вимірювального обладнання, зроблено висновки і підготовлено статтю до друку).*

6. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.**, Сподоба О. О. Експериментальне дослідження витрати енергії на процес початкового нагріву субстрату за використання електротепломеханічної системи. Electrical Engineering and Power Engineering. 2022. Вип. 1. С. 49–59. *(Здобувачем проведено експериментальне дослідження витрат енергії на початковий нагрів субстрату за використання електротепломеханічної системи, зроблено висновки, подано статтю до друку).*

7. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.**, Сподоба О. О. Експериментальне дослідження енергетичних втрат біогазового реактора в навколишнє середовище при мезофільному режимі зброджування. Енергетика і автоматика. 2022. № 2. С. 18–32. *(Здобувачем проведено експериментальне дослідження залежностей енергетичних втрат біореактора у навколишнє середовище при мезофільному режимі зброджування, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

**Стаття у науковому виданні іншої держави,
включеному до міжнародних наукометричних баз даних
Scopus та/або Web of Science Core Collection**

8. Заблодский Н. Н., **Сподоба М. А.**, Сподоба А. А. Экспериментальное исследование затрат энергии на процесс первоначального нагрева субстрата до температуры брожения. Problemele Energeticii Regionale. 2022. № 1. Вип. 53. С. 83–96. *(Здобувачем проведено експериментальне дослідження залежностей витрат енергії на процес початкового нагріву субстрату до температури зброджування, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

**Публікації у матеріалах наукових конференцій,
включених до міжнародних наукометричних бази даних
Scopus та/або Web of Science Core Collection**

9. Zablodskiy M., **Spodoba M.** Mathematical Model of Thermal Processes During the Fermentation of Biomass in a Biogas Reactor. 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020. P. 227–231. *(Здобувачем проведено дослідження впливу забруднюючого шару нагрівальної поверхні електротепломеханічної системи на процес тепловіддачі та кількості енергетичних витрат на підігрів субстрату у біогазовому реакторі, зроблено висновки та підготовлено публікацію до друку).*

10. Zablodskiy M., Kozyrskyi V., Zhyltsov A., Savchenko V., Sinyavsky O., **Spodoba M.**, Klendiy P. Klendiy G. Electrochemical Characteristics of the Substrate based on Animal Excrement During Methanogenesis with the Influence of a Magnetic Field. In 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2020. P. 530–535. *(Здобувачем проведено дослідження електрохімічних характеристик субстрату на основі екскрементів тварин під час метаногенезу під впливом магнітного поля, зроблено висновки та підготовлено публікацію до друку).*

11. Zablodskiy M., **Spodoba M.** Dynamic Analysis of Energy Consumption During Substrate Fermentation in a Biogas Reactor. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2021. P. 147–152. *(Здобувачем побудовано математичну модель та проведено дослідження динаміки зміни енергетичних витрат на процеси термостабілізації об'єму субстрату при використанні електротепломеханічної системи, зроблено висновки та підготовлено публікацію до друку).*

12. Zablodskiy M., **Spodoba M.** Comparison of Theoretical and Experimental Data of Energy Consumption when Heating the Substrate in a Biogas Reactor. In 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). 2022. P. 01–04. *(Здобувачем проведено порівняння теоретичних*

та експериментальних даних енерговитрат при нагріванні субстрату в біогазовому реакторі, зроблено висновки та підготовлено публікацію до друку).

Патенти України на винахід та корисні моделі

13. Заблудський М. М., **Сподоба М. О.**, Сподоба О. О. Біогазовий реактор: патент на корисну модель № 145242 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 101/00. u 202004181. Заявлено 08.07.2020. Опубліковано 25.11.2020. Бюл. № 22. 5 с. *(Здобувачем проведено патентний пошук, здійснено порівняльний аналіз існуючих аналогів, узагальнено та систематизовано результати, підготовлено заявку на патент).*

14. Заблудський М. М., **Сподоба М. О.**, Сподоба О. О. Пристрій для визначення об'єму утвореного у біогазових реакторах біогазу: патент на корисну модель № 147391 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 101/00. u 202007103. Заявлено 05.11.2020. Опубліковано 05.05.2021. Бюл. № 18. 5 с. *(Здобувачем проведено патентний пошук, здійснено порівняльний аналіз існуючих аналогів, узагальнено та систематизовано результати, підготовлено заявку на патент).*

15. Заблудський М. М., **Сподоба М. О.**, Сподоба О. О. Біогазовий реактор: патент на винахід № 126250 Україна, МПК C02F 11/04, C02F 3/28. a 202004191. Заявлено 08.07.2020. Опубліковано 07.09.2022. Бюл. № 36. 5 с. *(Здобувачем проведено патентний пошук, здійснено порівняльний аналіз існуючих аналогів, узагальнено та систематизовано результати, підготовлено заявку на патент).*

Тези наукових доповідей

16. **Сподоба М. О.**, Заблудський М. М., Радько І. П. Основні складові методології побудови заглибного електромеханічного перетворювача для біогазових комплексів. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: V Міжнародна науково-практична конференція, присвячена пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова, м. Київ, 19 грудня 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. С. 67–68. *(Здобувачем вивчено питання побудови заглибного електромеханічного перетворювача для біогазових реакторів, узагальнено та систематизовано результати).*

17. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.** Методика проведення експериментальних досліджень біогазового реактора з заглибною комбінованою системою перемішування та електричного підігріву. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природо-користування (теорія, практика, історія, освіта): IX Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 19–22 травня 2020 року: тези доповіді. Київ, 2020. С. 99–100. *(Здобувачем вивчено питання методики проведення експериментальних досліджень)*.

18. Zablodskiy M. M., **Spodoba M. O.** Improvement of the method for determining energy consumption in a biogas reactor. Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials (ICEPOM-12): XII International Conference, June 01–05, 2020. P. 311. *(Здобувачем проведено аналіз та удосконалено метод визначення енерговитрат у біореакторі)*.

19. Заблодський М. М., Шворов С. А., Клендій П. Б., Андрієвський А. П., Ковальчук С. І., **Сподоба М. О.** Інноваційна система переробки побічних продуктів птахівництва з впливом електромагнітного поля і автономним енергозабезпеченням. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: 6-й Міжнародний конгрес, м. Львів, 23–25 вересня 2020 року: тези доповіді. Львів, 2020. С. 134. *(Здобувачем розглянуто питання автономного енергозабезпечення інноваційної системи переробки побічних продуктів птахівництва)*.

20. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.** Обґрунтування створення електротепло-механічної системи перемішування та підігріву біомаси. Проблеми сучасної теплоенергетики: Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 100-річчю професора Бориса Харлампієвича Драганова, м. Київ, 10–11 грудня 2020 року: тези доповіді. Київ, 2020. С. 133–134. *(Здобувачем обґрунтовано створення електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву субстрату у біореакторі)*.

21. Заблодський М. М., **Сподоба М. О.** Безперервна реєстрація даних при експериментальних дослідженнях електротепломеханічної системи біогазового реактора. Сучасні проблеми землеробської механіки: XXIII Міжнародна наукова

конференція, присвячена 122-річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, м. Київ – м. Житомир, 16–18 жовтня 2022 року: тези доповіді. Київ, 2022. С. 223–226. *(Здобувачем проведено аналіз та розглянуто питання створення системи безперервної реєстрації даних при експериментальних дослідженнях електротепломеханічної системи біогазового реактора, узагальнено та систематизовано результати).*

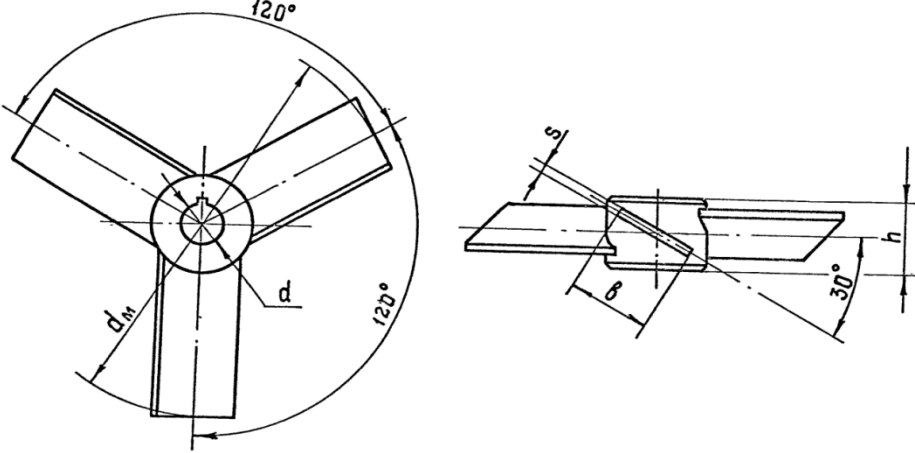
22. **Сподоба М. О.,** Заблудський М. М. Перспективи використання біогазових технологій для утилізації органічних відходів. Екологічно сталий розвиток урбосистем: Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція, м. Харків, 2–3 листопада 2022 року: тези доповіді. Харків, 2022. С. 111. *(Здобувачем розглянуто питання перспектив використання біогазових технологій для утилізації органічних відходів).*

23. **Сподоба М. О.,** Заблудський М. М. Енергоефективність електроприводу змішуючого пристрою біогазового реактора. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: Міжнародна науково-практична конференція, м. Харків, 22 грудня 2022 року: тези доповіді. Харків, 2022. С. 70–71. *(Здобувачем проведено аналіз та розглянуто питання енергоефективності електроприводу змішуючого пристрою для біогазового реактора, узагальнено та систематизовано результати).*

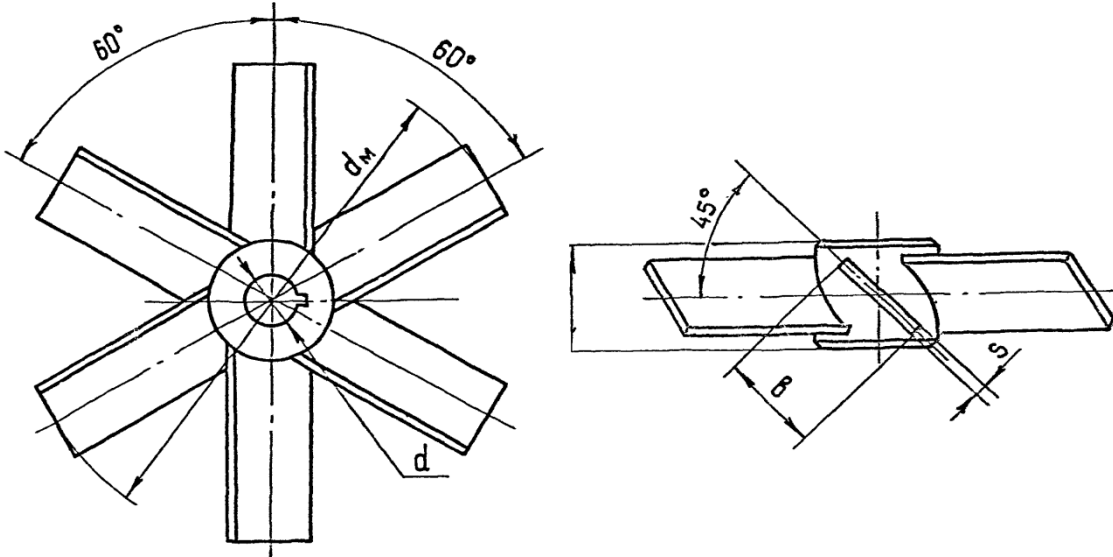
ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1

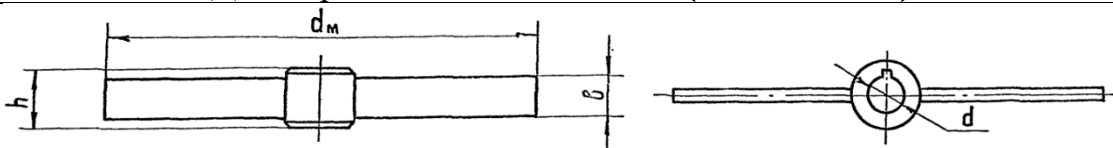
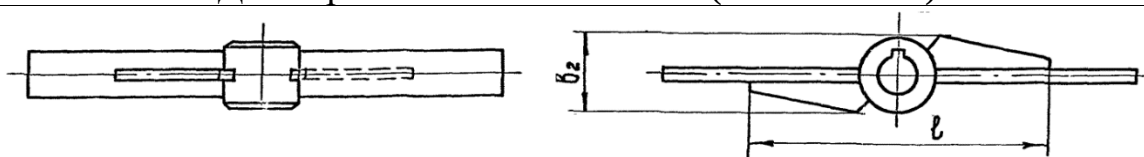
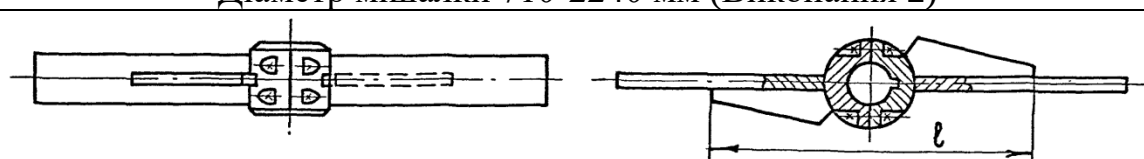
Технічна характеристика трьохлопатевої механічної мішалки типу 01

						
Діаметр мішалки, (d _м), мм	Висота лопатей (в), мм	Діаметр валу, (d), мм	Товщина лопаті, (s), мм	Допустимий крутний момент, кНм	Маса, кг, не більше	
80	16	18	3	0,002	0,31	
100	20			0,003	0,33	
125	25			0,005	0,37	
160	32			0,008	0,44	
180	36	25	4	0,011	0,76	
200	40			0,016	0,82	
220	44			0,02	0,88	
250	50			0,03	2,38	
280	56	45		0,05	2,57	
320	64			0,06	2,71	
360	72			0,08	2,87	
400	80			0,1	3,4	
450	90	60	6	0,12	3,9	
500	100			0,16	4,45	
560	112			0,2	5,11	
630	126			0,28	13,3	
710	142	80	8	0,45	15	
800	160			0,6	17,1	
900	180			0,8	19,9	
1000	200			1	50	
1120	224	80	10	1,2	55	
1250	250			1,6	62	

Технічна характеристика шестилопатевої механічної мішалки типу 05

					
Діаметр мішалки, (d _м), мм	Висота лопатей (в), мм	Діаметр валу, (d), мм	Товщина лопаті, (s), мм	Допустимий крутний момент, кНм	Маса, кг, не більше
100	20	18	3	0,005	0,37
125	25			0,008	0,45
160	32			0,016	0,62
180	36	25	4	0,02	1,04
200	40			0,03	1,14
220	44			0,04	1,34
250	50			0,05	2,93
280	56			0,06	3,3
320	64			0,1	3,7
360	72			0,12	4,8
400	80	45	6	0,16	7,9
450	90			0,2	9,1
500	100			0,28	10,5
560	112			0,35	20,1
630	126			0,45	21,4
710	142			0,6	31,6
800	160			0,8	36,2
900	180	60	8	1,2	56,0
1000	200			1,6	76,7
1120	224			2,0	96,7
1250	250			2,5	126,6
		80	10		

Технічна характеристика лопатевої механічної мішалки типу 07

Діаметр мішалки 125-630 мм (Виконання 1)						
						
Діаметр мішалки 710-2240 мм (Виконання 1)						
						
Діаметр мішалки 710-2240 мм (Виконання 2)						
						
$l = 0,63 \cdot d_m ; v_2 = 1,5 \cdot v.$						
Діаметр мішалки, (d_m), мм	Висота лопатей (v), мм	Діаметр валу, (d), мм	Товщина лопаті, (s), мм	Допустимий крутний момент, кНм	Маса, кг, не більше	
125	12	18	3	0,002	0,17	
160	16		4	0,003	0,29	
180	18			0,005	0,32	
200	20	25		0,007	0,35	
220	22			0,09	0,45	
250	25			0,011	0,5	
280	28			0,016	0,63	
320	32			0,02	0,73	
360	36	6	0,03	1,16		
400	40		0,04	1,34		
450	45		0,06	1,83		
500	50	32	8	0,08	2,89	
560	56			0,1	3,4	
630	64			0,16	4,0	
710	72	45	10	0,2	6,3	
800	80			0,28	7,5	
900	90			0,35	9,9	
1000	100		12	0,45	13	
1120	112	60		0,6	19	
1250	125			0,8	21	

(продовження таблиці Б.3)

Діаметр мішалки, (d _м), мм	Висота лопатей (в), мм	Діаметр валу, (d), мм	Товщина лопаті, (s), мм	Допустимий крутний момент, кНм	Маса, кг, не більше
1400	140	80	12	1,2	29,5
1600	160		14	1,6	37,4
1800	180	90		2	54
2000	200			3	64,1
2240	224			4	78,8

Додаток В

В.1. Тепловіддача при вимушеному зовнішньому обтіканні тіл

Поздовжнє обтікання пластини і поверхні труби

Коефіцієнт тепловіддачі (α) для циліндричного тіла:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_p}{d_{рез}} \quad (B.1)$$

Коефіцієнт тепловіддачі (α) для пластини:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_p}{l}, \quad (B.2)$$

де Nu – безрозмірний критерій Нуссельта; λ_p – коефіцієнт теплопровідності речовини, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$; $d_{рез}$ – діаметр резервуара, $м$; l – характерний розмір пластини, $м$.

Місцевий (Nu_x) та середній $\overline{Nu}$ по усій поверхні, коефіцієнт тепловіддачі при ламінарному потоці речовини ($Re < 5 \cdot 10^5$) уздовж пластини або поверхні труби рівні:

При незмінній температурі стінки:

$$Nu_x = 0.332 \cdot Re_x^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}, \quad (B.3)$$

$$\overline{Nu} = 0.664 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}. \quad (B.4)$$

При незмінному тепловому потоці:

$$Nu_x = 0.46 \cdot Re_x^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}, \quad (B.5)$$

$$\overline{Nu} = 0.69 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}. \quad (B.6)$$

Місцевий (Nu_x) та середній $\overline{Nu}$ по поверхні коефіцієнт тепловіддачі при турбулентному потоці речовини ($Re \geq 5 \cdot 10^5$) уздовж пластини або поверхні труби рівні:

$$Nu_x = 0.0296 \cdot Re_x^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}, \quad (B.7)$$

$$\overline{Nu} = 0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}. \quad (B.8)$$

Підчас перемішування речовини їх нагрівання або охолодження відбувається через стінку реактора або за допомогою нагрівачів занурених у об'єм речовини. При цьому коефіцієнт тепловіддачі рівний:

$$Nu_x = 0.40 \cdot Re^{0.62} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}, \quad (B.9)$$

$$\overline{Nu} = 1.01 \cdot Re^{0.62} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}. \quad (B.10)$$

В.2. Визначення числа Рейнольдса при обтіканні пластини

Для місцевого коефіцієнту тепловіддачі:

$$Re_x = \frac{\rho \cdot w_x \cdot l_x}{\mu}, \quad (B.11)$$

Для середнього коефіцієнту тепловіддачі:

$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot l}{\mu}, \quad (B.12)$$

де w – швидкість руху речовини, m/c , w_x – швидкість руху речовини у точці x , m/c .

В.3. Тепловіддача за умови природньої конвекції у об'ємі субстрату

Безрозмірний критерій Нуссельта:

$$Nu = 0.73 \cdot (Pr \cdot Gr)^{0.25}, \quad (B.13)$$

де Pr – критерій Прандтля; Gr – критерій Грасгофа.

$$Gr = \frac{g \cdot d_2^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot (T_c - T_{cyб}), \quad (B.14)$$

де g – прискорення вільного падіння, m/s^2 ; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості субстрату, m^2/s ; β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення субстрату, $1/({}^{\circ}C)$.

В.4. Динамічний аналіз енергетичних витрат під час підігріву субстрату електричним підігрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора

Біогазовий реактор циліндричної форми з наступними геометричними параметрами: висота $H = 0,6$ м, внутрішній діаметр $d_6 = 0,368$ м, зовнішній діаметр $d_5 = 0,37$ м, матеріал біогазового реактора – сталь, коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{cm} = 45$ Вт/(м· $^{\circ}C$); товщина стінки реактора $\delta_{cm} = 0,001$ м, маса реактора $m_p = 3$ кг, питома теплоємність матеріалу з якого виконано реактор $c_p = 440$ Дж/(кг· $^{\circ}C$) [9].

Фізико-хімічні параметри органічного субстрату завантаженого у біогазовий реактор: вологість рівна 90%, коефіцієнт теплопровідності субстрату $\lambda = 0,58$ Вт/(м· $^{\circ}C$), питома густина субстрату $\rho_{cyб} = 1000$ кг/м³, питома теплоємність субстрату $c_{cyб} = 4200$ Дж/(кг· $^{\circ}C$), маса субстрату $m_{cyб} = 40$ кг, динамічна в'язкість субстрату $\mu = 0,001004$ Па·с, висота субстрату у біогазовому реакторі $l_2 = 0,4$ м. Частота обертів перемішуючого пристрою $n = 40$ об/хв [9].

У якості утеплювального матеріалу приймаємо мінеральну вату з наступними параметрами: коефіцієнт теплопровідності ізолюючого матеріалу $\lambda_{із.мат} = 0,037$ Вт/(м· $^{\circ}C$), товщина ізолюючого матеріалу $\delta_{із.мат} = 0,1$ м,

внутрішній діаметр ізолюючого матеріалу $d_4 = 0,37$ м, зовнішній діаметр ізолюючого матеріалу $d_3 = 0,57$ м. Шар мінеральної вати захищено металевим кожухом з наступними параметрами: зовнішній діаметр захисного кожуху $d_1 = 0,58$ м, внутрішній діаметр $d_2 = 0,576$ м. Захисний кожух виконано з матеріалу, що і біогазовий реактор, тому коефіцієнт теплопровідності кожуху $\lambda_{cm} = 45$ Вт/(м·°C), товщина стінки захисного кожуху $\delta_{cm} = 0,002$ м [9].

Підігрів виконано електричним нагрівальним кабелем із вуглецевого волокна з ізоляцією із кремнійорганічної гуми марки КН141 з наступними технічними характеристиками: зовнішній діаметр кабелю $d_k = 0,003$ м, електричний опір одного метру кабелю $R_k = 141$ Ом/м, діаметр спіралі $d_{cn} = 0,001$ м, маса одного метру погонного спіралі $m_{cn} = 0,002$ кг, питома теплоємність спіралі $c_{cn} = 1800$ Дж/(кг·°C), маса одного метру погонного ізоляції нагрівального кабелю $m_{iz} = 0,008$ кг, питома теплоємність ізоляції $c_{iz} = 4900$ Дж/(кг·°C). Електричний нагрівальний кабель з'єднаний паралельними відрізками, кількість відрізків – 4 шт, довжина одного відрізка $l_k = 5$ м, загальна довжина нагрівального кабелю змонтованого на зовнішній стінці біогазового реактора (рис. 2.12) $l = 20$ м, сумарна потужність прикладена до електричного нагрівального кабелю ($P = 274,4$ Вт). Номінальна температура нагрівального кабелю $T_{к.ном} = 60$ °C [9].

Для проведення динамічного аналізу зміни температури субстрату під час підігріву електричним підігрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора, було використано наступні початкові умови: $T_{cn}[0] = 34$ °C, $T_{iz}[0] = 34$ °C, $T_c[0] = 34$ °C, $T_{cyб}[0] = 34$ °C, $v_{вim} = const = 5$ м/с, $P = 274,4$ Вт $T_{навк} = const = 10$ °C. Кінцева умова розрахунку: $T_{cyб} = 36$ °C.

У дослідженнях [3, 6, 9] встановлено, що теплопередача під час

перемішування інтенсивніша, через це, прийнято, що під час підігріву відбувається перемішування.

Результати динамічного аналізу представлено у вигляді графічних залежностей на яких зображено: залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю (рис. В.1); залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю (рис. В.2); залежність зміни температури стінки реактора (рис. В.3); залежність зміни температури субстрату на 2 °C, від тривалості підігріву (рис. В.4).

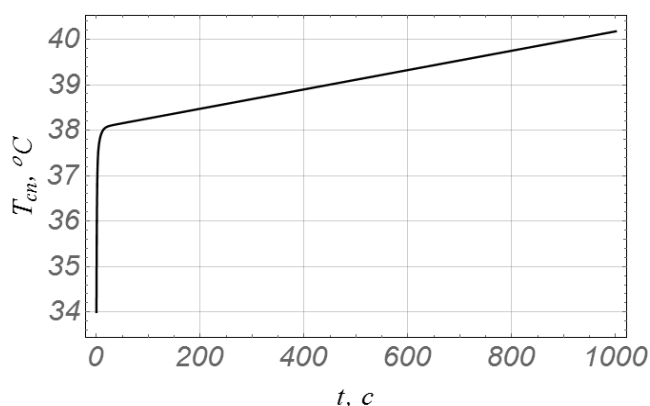


Рис. В.1. Залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю змонтованого на стінці біогазового реактора від тривалості підігріву

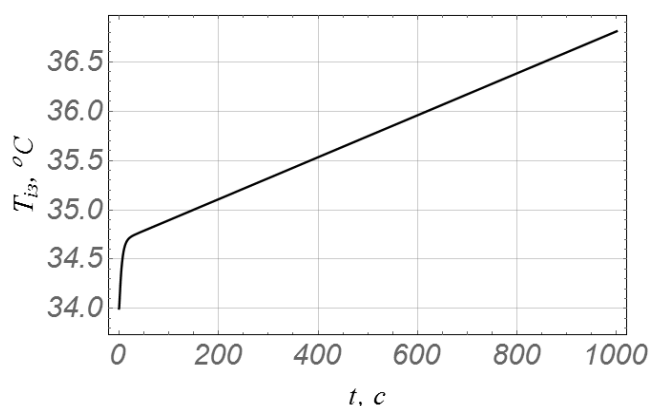


Рис. В.2. Залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю змонтованого на стінці біогазового реактора від тривалості підігріву

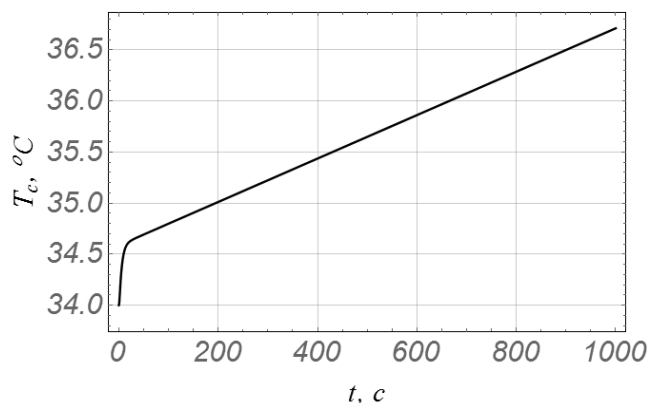


Рис. В.3. Залежність зміни температури стінки реактора від тривалості підігріву

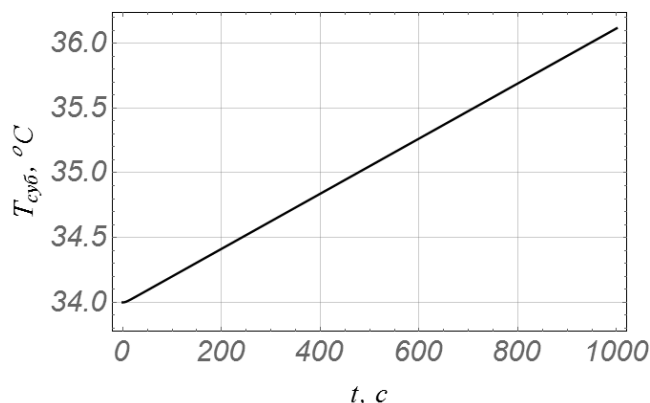


Рис. В.4. Залежність зміни температури субстрату від тривалості підігріву

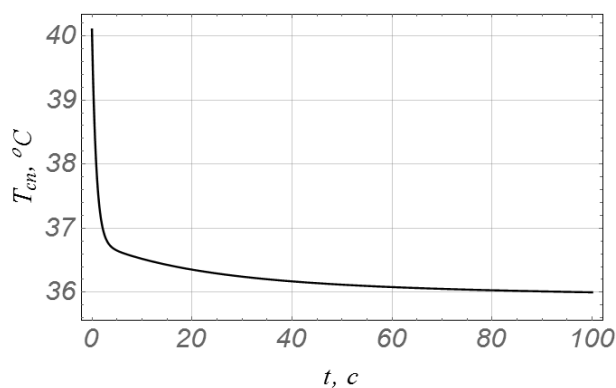
Провівши аналіз графічних залежностей зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю (рис. В.1), температури ізоляції електричного нагрівального кабелю (рис. В.2), температури стінки реактора (рис. В.3) та температури субстрату на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, від тривалості підігріву (рис. В.4), встановлено, що для нагріву субстрату у біогазовому реакторі на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ необхідно витратити ($\tau_{nid.1} = 950\text{ c}$). Знаючи час ($\tau_{nid.1}$), визначено, що при використанні системи підігріву, що складається з електричного нагрівального кабелю змонтованого на стінці біогазового реактора, для нагріву субстрату у біогазовому реакторі на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ необхідно витратити $W_1 = 260680\text{ Дж}$.

Після завершення процесу підігріву субстрату температура об'єктів є різною, про що свідчать графічні залежності (рис. В.1 – рис. В.4), згідно закону термодинамічної рівноваги температура об'єктів протягом певного проміжку часу врівноважується. Проведено динамічний аналіз процесу охолодження об'єктів, за наявності перемішування ($n = 40\text{ об/хв}$) та відсутності ($n = 0\text{ об/хв}$), після завершення процесу підігріву субстрату у реакторі за допомогою нагрівального кабелю змонтованого на зовнішній стінці біогазового реактора.

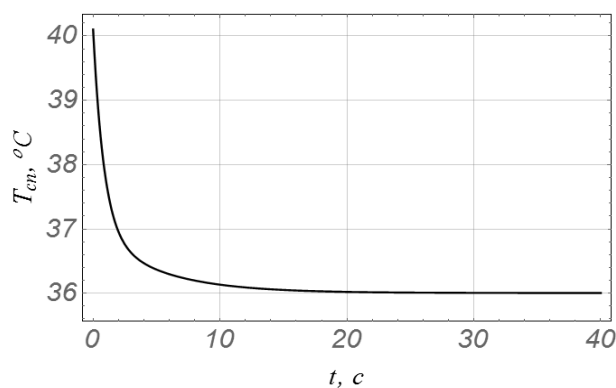
Метою динамічного аналізу охолодження є дослідження процесу зміни температури та визначення тривалості процесу врівноваження температури об'єктів.

Початкові умови: $v_{\text{вм}} = \text{const} = 5\text{ м/с}$, $T_{\text{нагк}} = \text{const} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0\text{ Вт}$, $T_{\text{сн}}[0] = 40,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{із}}[0] = 36,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{с}}[0] = 36,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{суб}}[0] = 36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кінцева умова розрахунку: $T_{\text{сн}} = T_{\text{із}} = T_{\text{с}} = T_{\text{суб}}$.

Результати динамічного аналізу представлено у вигляді графічних залежностей на яких зображено: залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю (рис. В.5); залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю (рис. В.6); залежність зміни температури стінки реактора (рис. В.7); залежність зміни температури субстрату (рис. В.8).



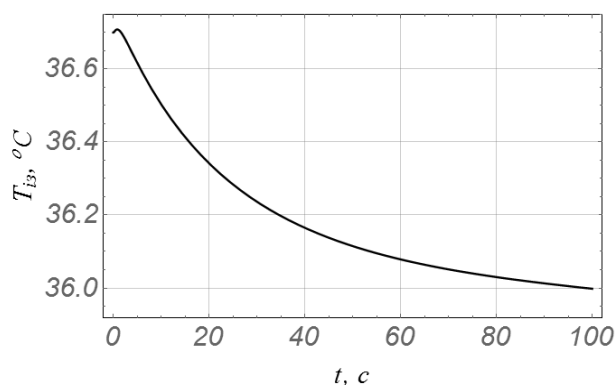
а)



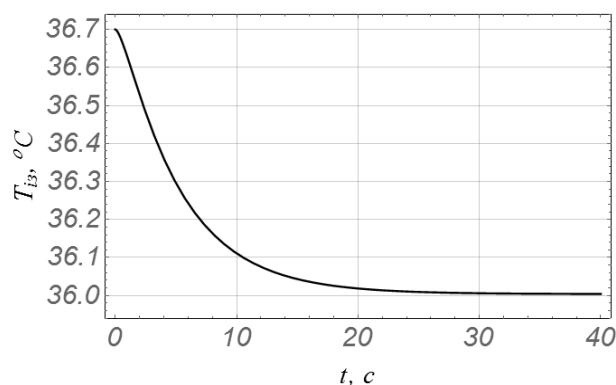
б)

Рис. В.5. Залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю змонтованого на стінці біогазового реактора від тривалості охолодження:

а) без перемішування, б) з перемішуванням



а)



б)

Рис. В.6. Залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю змонтованого на стінці біогазового реактора від тривалості охолодження:

а) без перемішування, б) з перемішуванням

Розглянувши графічні залежності зміни температури спіралі та ізоляції електричного нагрівального кабелю (рис. В.5 а, б) та (рис. В.6 а, б) помітно, що зниження температури спіралі має лавиноподібний характер, тоді як температура ізоляції зменшується за гіперболічною характеристикою. За відсутності перемішування охолодження відбувається повільніше.

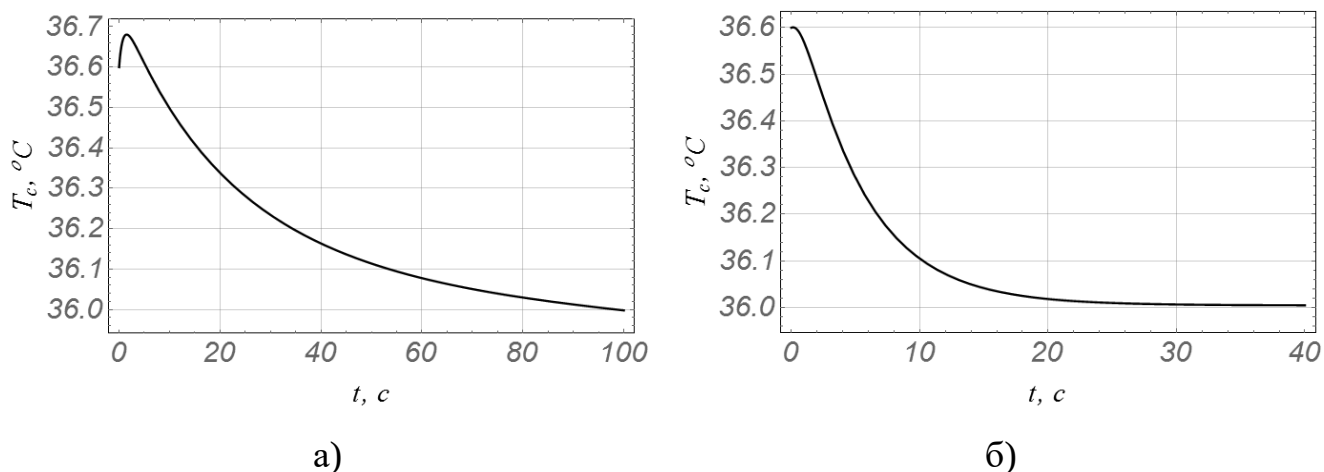


Рис. В.7. Залежність зміни температури стінки реактора від тривалості охолодження: а) без перемішування, б) з перемішуванням

З (рис. В.7 а) помітно, що у момент часу ($t=0...5$ с) стінка збільшує свою температуру, тоді як, на (рис. В.7 б) такого зростання температури не спостерігається, це пояснюється різними значеннями коефіцієнтів тепловіддачі, котрі залежать від режиму руху речовини. Таким чином, за відсутності перемішування (рис. В.7 а) електричний нагрівальний кабель притиснений до зовнішньої стінки реактора віддає свою температуру до стінки реактора швидше ніж субстрат сприймає її від стінки реактора.

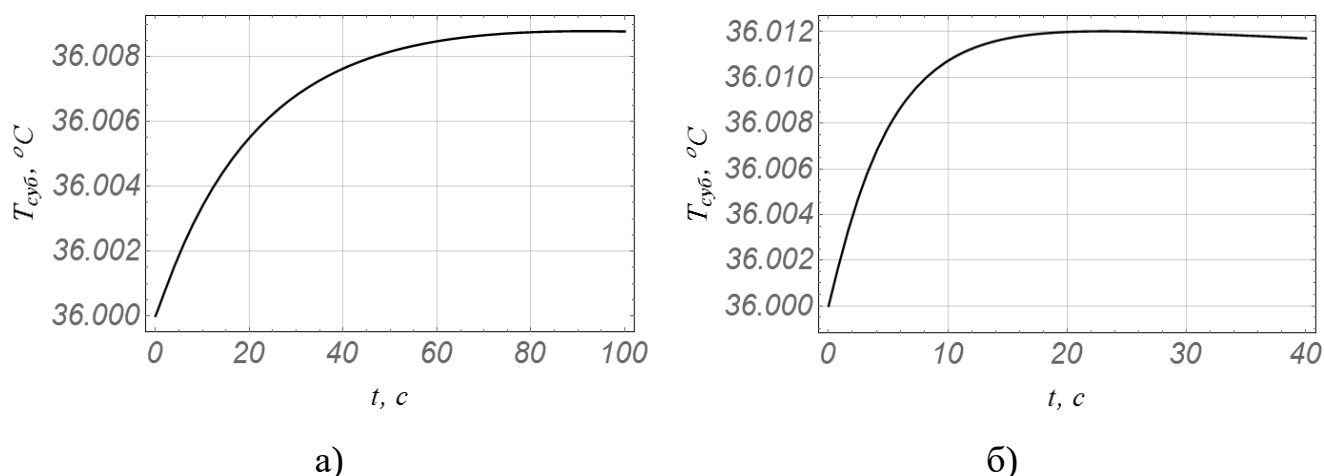


Рис. В.8. Залежність зміни температури субстрату від тривалості охолодження: а) без перемішування, б) з перемішуванням

Аналізуючи графічну залежність зміни температури субстрату від

тривалості охолодження за відсутності перемішування (рис. В.8 а), можна зробити висновок, що у момент часу ($t = 100 \text{ с}$) температура врівноважилась і стала рівною ($T_{cn} = T_{iz} = T_c = T_{cyб} = 36,009 \text{ }^{\circ}\text{C}$), тоді як, за наявності перемішування (рис. В.8 б) процес врівноваження температури відбувся у момент часу ($t = 25 \text{ с}$), а температура стала рівною ($T_{cn} = T_{iz} = T_c = T_{cyб} = 36,012 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Провівши аналіз графічних залежностей можна зробити висновок, що не зважаючи на те, що під час підігріву субстрату за допомогою електричного нагрівального кабелю розміщеному на зовнішній стінці біогазового реактора, усі об'єкти взаємодіють між собою, але врівноваження їхньої температури відбувається не однаково, як за наявності перемішування так і його відсутності.

В.5. Динамічний аналіз енергетичних витрат підчас підігріву субстрату електричним підігрівачем розміщеним у лопатях двоярусної лопатевої мішалки

Біогазовий реактор циліндричної форми з наступними геометричними параметрами: висота $H = 0,6 \text{ м}$, внутрішній діаметр $d_6 = 0,368 \text{ м}$, зовнішній діаметр $d_5 = 0,37 \text{ м}$, матеріал біогазового реактора – сталь, коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{cm} = 50 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}$; товщина стінки реактора $\delta_{cm} = 0,001 \text{ м}$, маса реактора $m_p = 3 \text{ кг}$, питома теплоємність матеріалу з якого виконано реактор $c_p = 440 \text{ Дж/(кг} \cdot ^{\circ}\text{C)}$. Фізико-хімічні параметри органічного субстрату завантаженого у біогазовий реактор: вологість рівна 90%, коефіцієнт теплопровідності субстрату $\lambda = 0,58 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}$, питома густина субстрату $\rho_{cyб} = 1000 \text{ кг/м}^3$, питома теплоємність субстрату $c_{cyб} = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot ^{\circ}\text{C)}$, маса субстрату $m_{cyб} = 40 \text{ кг}$, динамічна в'язкість субстрату $\mu = 0,001004 \text{ Па} \cdot \text{с}$, висота субстрату у біогазовому реакторі $l_2 = 0,4 \text{ м}$. Частота обертів комбінованої

системи перемішування та підігріву субстрату $n = 40 \text{ об/хв}$ [9].

У якості утеплювального матеріалу приймаємо мінеральну вату з наступними параметрами: коефіцієнт теплопровідності ізолюючого матеріалу $\lambda_{із.мат} = 0,037 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, товщина ізолюючого матеріалу $\delta_{із.мат} = 0,1 \text{ м}$, внутрішній діаметр ізолюючого матеріалу $d_4 = 0,37 \text{ м}$, зовнішній діаметр ізолюючого матеріалу $d_3 = 0,57 \text{ м}$ [9].

Шар мінеральної вати захищено металевим кожухом з наступними параметрами: зовнішній діаметр захисного кожуху $d_1 = 0,58 \text{ м}$, внутрішній діаметр $d_2 = 0,576 \text{ м}$. Захисний кожух виконано з матеріалу, що є біогазовий реактор, коефіцієнт теплопровідності захисного кожуху $\lambda_{см} = 45 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, товщина стінки захисного кожуху $\delta_{см} = 0,002 \text{ м}$ [9].

Підігрів виконано електричним нагрівальним кабелем із вуглецевого волокна з ізоляцією із кремнійорганічної гуми марки КН141 з наступними технічними характеристиками: зовнішній діаметр кабелю $d_k = 0,003 \text{ м}$, електричний опір одного метру кабелю $R_k = 141 \text{ Ом/м}$, діаметр спіралі $d_{сн} = 0,001 \text{ м}$, маса одного метру погонного спіралі нагрівального кабелю $m_{сн} = 0,002 \text{ кг}$, питома теплоємність спіралі $c_{сн} = 1800 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$, маса одного метру погонного ізоляції нагрівального кабелю $m_{із} = 0,008 \text{ кг}$, питома теплоємність ізоляції $c_{із} = 4900 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$. Нагрівальний кабель вмонтовано у лопаті двоярусної мішалки, кожна лопать є окремою секцією підігріву, всі секції з'єднано паралельно. Кількість відрізків електричного нагрівального кабелю у одній лопаті – 1 шт, довжина одного відрізка $l_k = 5 \text{ м}$. Потужність однієї секції підігріву $P_i = 68,6 \text{ Вт}$. Кількість секцій підігріву рівна кількості лопатей механічної мішалки ($n_1 = 4$), сумарна потужність прикладена до електричного нагрівального кабелю становить: $(P = \sum P_i \cdot n_1 = 274,4 \text{ Вт})$. Загальна довжина

нагрівального кабелю ($l = 20 \text{ м}$). Номінальна температура електричного нагрівального кабелю $T_{к.ном} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Прийнято, що під час підігріву відбувається перемішування [9].

Для проведення динамічного аналізу зміни температури субстрату під час підігріву комбінованою системою перемішування та електричного підігріву виконаного електричним нагрівальним кабелем, котрий змонтовано у лопатях двоярусної лопатевої мішалки, було використано наступні початкові умови: $T_{суб}[0] = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{сн}[0] = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{із}[0] = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{л}[0] = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{с}[0] = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{навк} = \text{const} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $v_{вм} = \text{const} = 5 \text{ м/с}$, $P = 274,4 \text{ Вт}$ [9].

Кінцева умова розрахунку: $T_{суб} = 36 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результати динамічного аналізу представлено у вигляді графічних залежностей [9], на яких зображено: залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю (рис. В.9); залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю (рис. В.10); залежність зміни температури лопаті (рис. В.11), залежність зміни температури субстрату на $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, від тривалості підігріву (рис. В.12) та залежність зміни температури стінки реактора (рис. В.13).

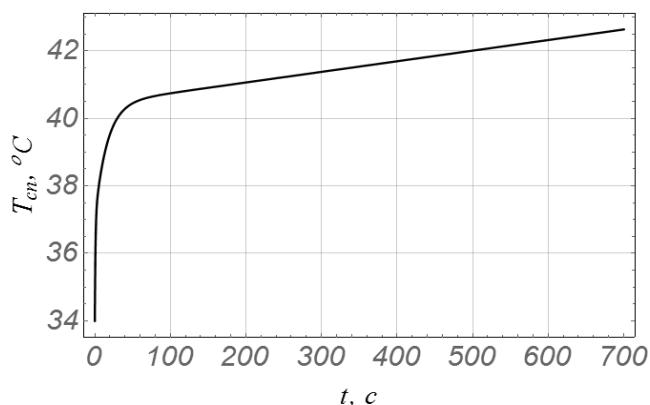


Рис. В.9. Залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопать двоярусної лопатевої мішалки від тривалості підігріву

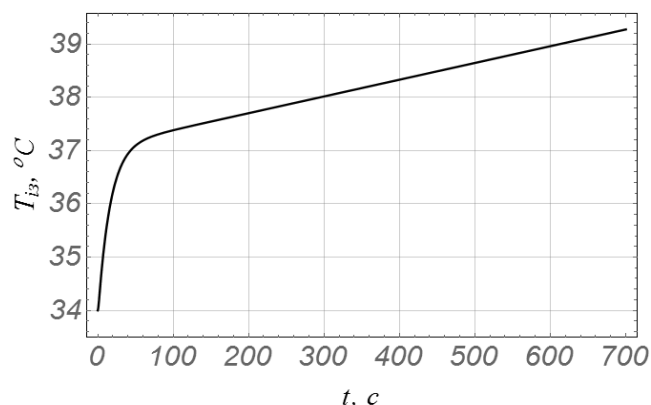


Рис. В.10. Залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопать двоярусної лопатевої мішалки від тривалості підігріву

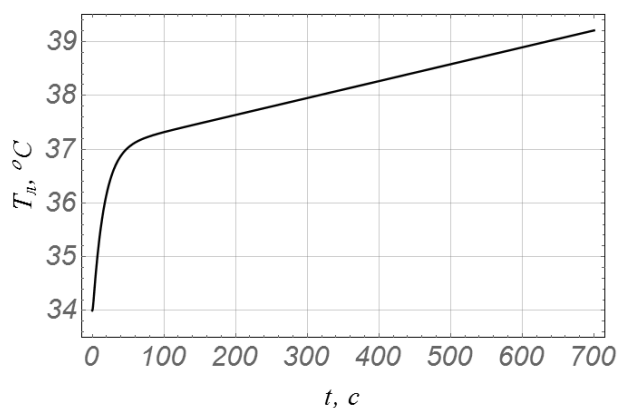


Рис. В.11. Залежність зміни температури лопаті мішалки від тривалості підігріву

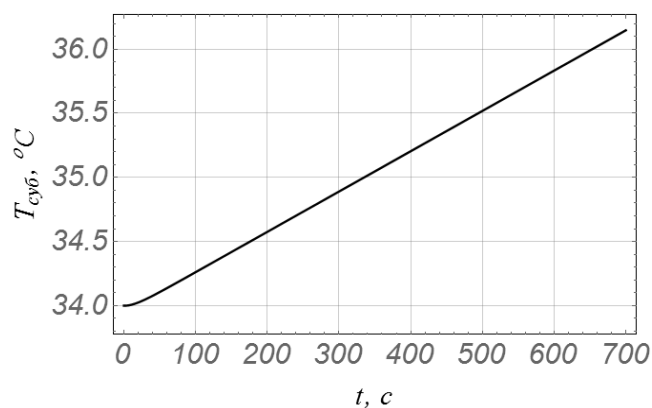


Рис. В.12. Залежність зміни температури субстрату від тривалості підігріву

Провівши аналіз графічних залежностей представлених на (рис. В.9), (рис. В.10), (рис. В.11), (рис. В.12) та (рис. В.13), встановлено, що для нагріву субстрату у біогазовому реакторі на 2 °C необхідно витратити ($\tau_{ni\partial.2} = 650$ с). Знаючи час ($\tau_{ni\partial.2}$), за формулою (2.124), визначено, що при використанні системи

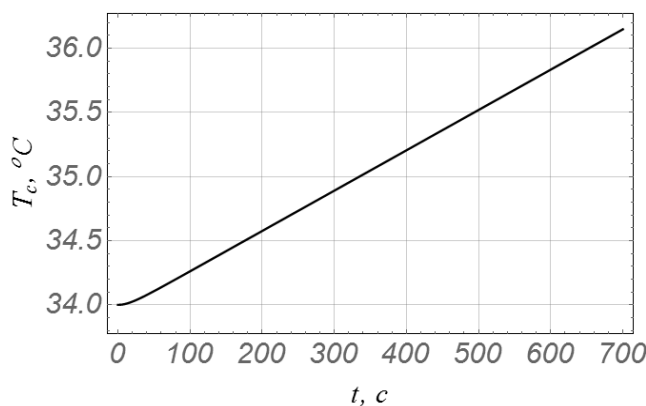


Рис. В.13. Залежність зміни температури стінки реактора від тривалості підігріву

підігріву, що складається з нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки, для нагріву субстрату у біогазовому реакторі на 2 °C, необхідно витратити $W_2 = 178360$ Дж.

Проведений динамічний аналіз дав змогу встановити кількість енергії необхідної на нагрів об'єму субстрату на 2 °C, який знаходиться у реакторі при використанні комбінованої електротепломеханічної системи для перемішування та електричного підігріву, а також отримати залежності зміни температури електричного нагрівального кабелю та повну картину зміни температури усіх об'єктів у процесі термостабілізації анаеробного бродіння [9].

Після завершення процесу підігріву субстрату температура об'єктів є різною, про що свідчать графічні залежності (рис. В.9 – рис. В.13), згідно закону термодинамічної рівноваги температура об'єктів протягом певного проміжку часу врівноважується. Проведено динамічний аналіз процесу охолодження об'єктів, за наявності перемішування ($n=40$ об/хв) та відсутності ($n=0$ об/хв), після завершення процесу підігріву субстрату у біогазовому реакторі за допомогою комбінованої системи перемішування та електричного підігріву вмонтованого у лопаті мішалки. Метою динамічного аналізу процесу охолодження є дослідження зміни температури та визначення тривалості врівноваження температури об'єктів.

Початкові умови: $v_{\text{вм}} = \text{const} = 5 \text{ м/с}$, $T_{\text{нагр}} = \text{const} = 10^\circ\text{C}$, $P = 0 \text{ Вт}$,
 $T_{\text{сп}}[0] = 42,5^\circ\text{C}$, $T_{\text{із}}[0] = 39,15^\circ\text{C}$, $T_{\text{л}}[0] = 39,05^\circ\text{C}$, $T_{\text{суб}}[0] = 36^\circ\text{C}$,
 $T_{\text{с}}[0] = 36^\circ\text{C}$. Кінцева умова розрахунку: $T_{\text{сп}} = T_{\text{із}} = T_{\text{л}} = T_{\text{суб}} = T_{\text{с}}$.

Результати динамічного аналізу представлено у вигляді графічних залежностей на яких зображено: залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю (рис. В.14); залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю (рис. В.15); залежність зміни температури лопаті (рис. В.16), залежність зміни температури субстрату (рис. В.17) та залежність зміни температури стінки реактора (рис. В.18).

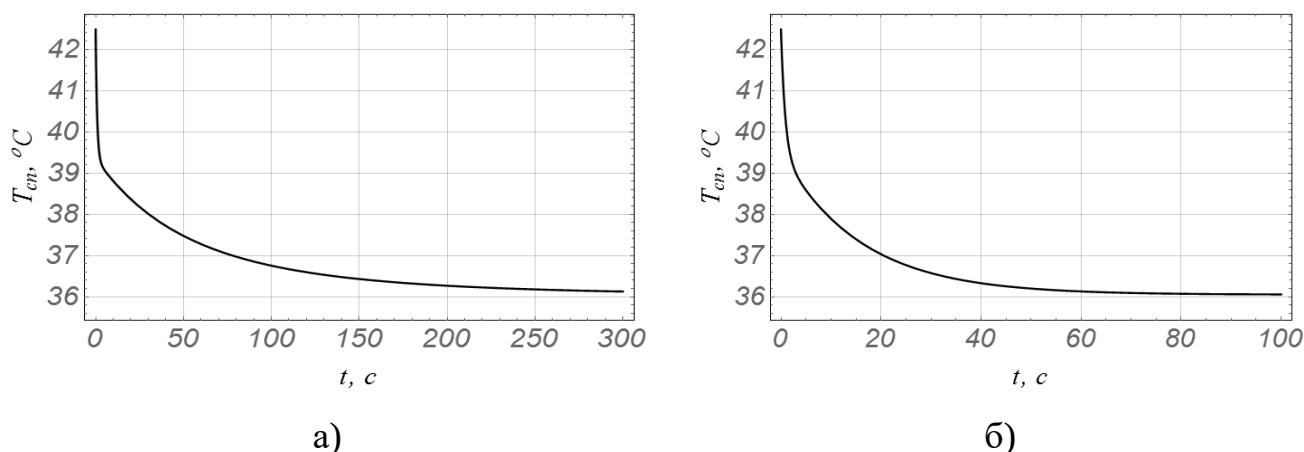


Рис. В.14. Залежність зміни температури спіралі електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті мішалки від тривалості охолодження: а) без перемішування, б) з перемішуванням

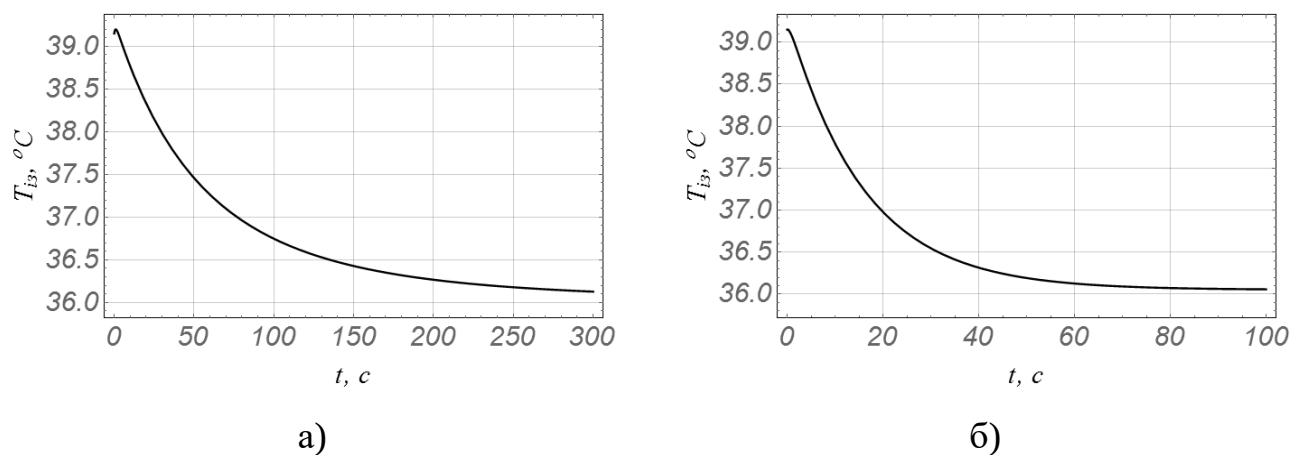


Рис. В.15. Залежність зміни температури ізоляції електричного нагрівального кабелю вмонтованого у лопаті мішалки від тривалості охолодження: а) без перемішування, б) з перемішуванням

Розглянувши графічні залежності зміни температури спіралі та ізоляції нагрівального кабелю (рис. В.14 а, б) та (рис. В.15 а, б) помітно, що у момент часу ($t = 0 \dots 5$ с) зниження температури спіралі має лавиноподібний характер, тоді як температура ізоляції зменшується за гіперболічною характеристикою. Наявність перемішування призводить до інтенсифікації процесу охолодження.

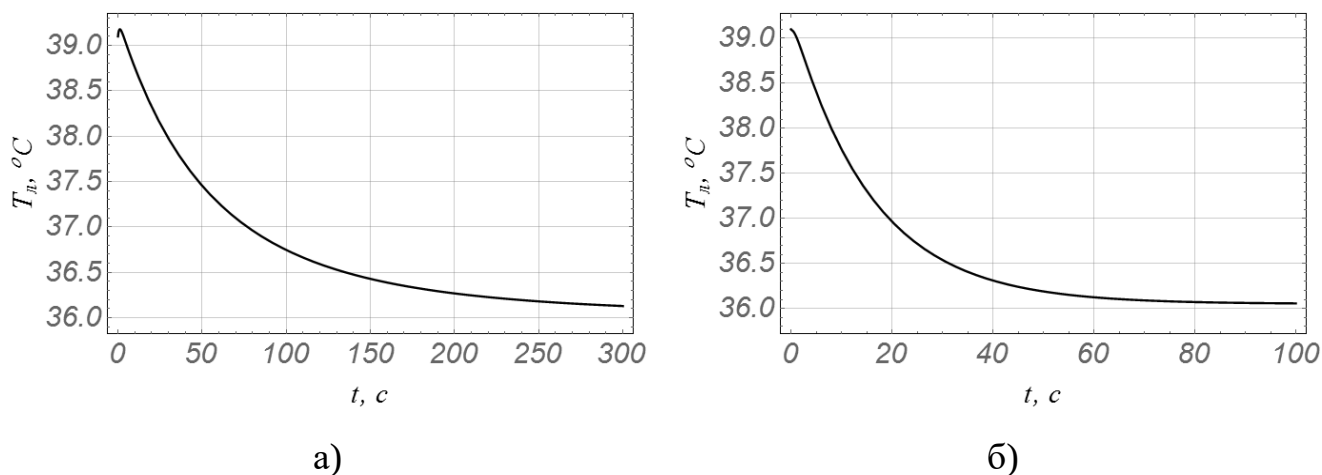


Рис. В.16. Залежність зміни температури лопаті мішалки від тривалості охолодження: а) без перемішування, б) з перемішуванням

З (рис. В.16 а) помітно, що у момент часу ($t = 0 \dots 10$ с) температура лопаті збільшується, тоді як, на (рис. В.16 б) такого зростання температури не спостерігається, це пояснюється режимом руху речовини та значеннями

коефіцієнтів тепловіддачі. За відсутності перемішування, нагрівальний кабель вмонтований у лопаті мішалки віддає своє тепло до стінки лопаті швидше ніж тепло передається у об'єм субстрату.

Аналізуючи графічні залежності зміни температури субстрату (рис. В.17 а), та стінки реактора (рис. В.18 а) від тривалості охолодження за відсутності перемішування, можна зробити висновок, що у момент часу ($t = 250$ с) температура врівноважилась і стала рівною ($T_{cn} = T_{iz} = T_l = T_{cyб} = T_c = 36,025$ °C), тоді як, за наявності перемішування (рис. В.17 б) та (рис. В.18 б) процес врівноваження температури відбувся швидше і у момент часу ($t = 80$ с), температура стала рівною ($T_{cn} = T_{iz} = T_l = T_{cyб} = T_c = 36,053$ °C).

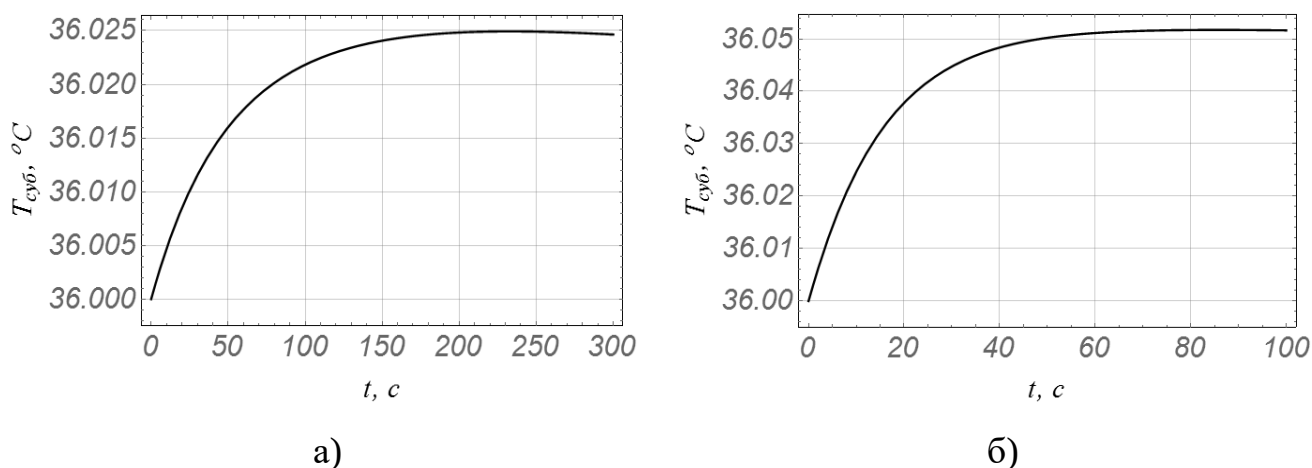


Рис. В.17. Залежність зміни температури субстрату від тривалості охолодження:
а) без перемішування, б) з перемішуванням

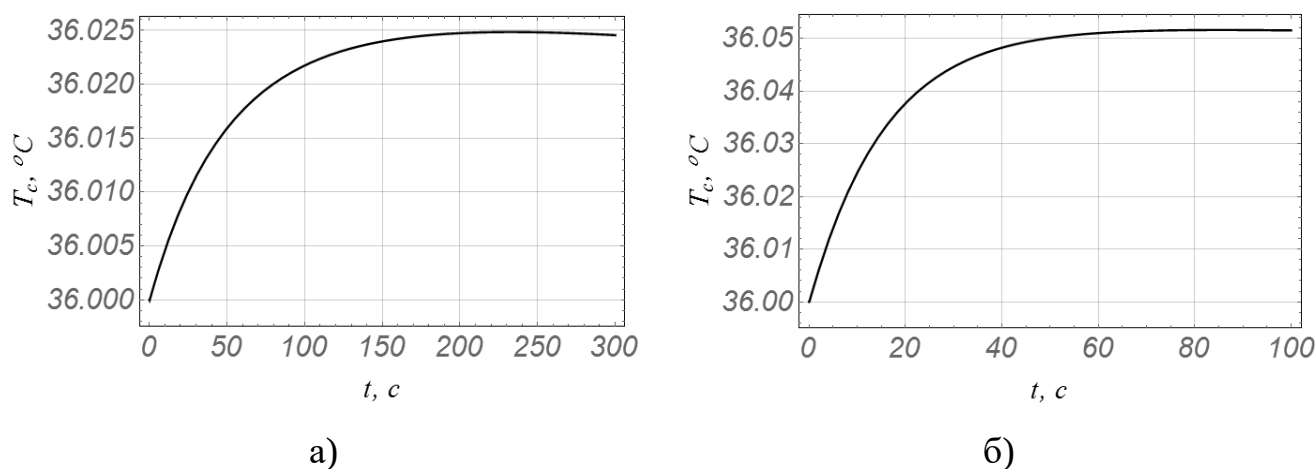


Рис. В.18. Залежність зміни температури стінки реактора від тривалості охолодження: а) без перемішування, б) з перемішуванням

Аналіз графічних залежностей показав, що за відсутності перемішування температура врівноваження об'єктів відбувається у 68 % повільніше ніж за наявності перемішування, при цьому, значення температури менше на $0,028^{\circ}\text{C}$.

З погляду енергетичної ефективності, не зважаючи на менше значення температури, тривалість врівноваження більша, але при цьому, не потрібно використовувати електричну енергію на процес перемішування, тому ефективніше використовувати саме охолодження електротепломеханічної системи підігріву за відсутності перемішування.

ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1

Г.1. Геометричні та масові параметри біогазового реактора

Елемент системи	Параметр	Примітка
Біогазовий реактор	Висота – 0,6 м Діаметр зовнішній – 0,37 м Діаметр внутрішній – 0,368 м	Матеріал біогазового реактора – вуглецева сталь
Утеплювальний матеріал	Висота – 0,6 м Діаметр зовнішній – 0,576 м Діаметр внутрішній – 0,37 м	Мінеральна вата
Зовнішній захисний корпус	Висота – 0,6 м Діаметр зовнішній – 0,58 м Діаметр внутрішній – 0,576 м	Матеріал зовнішнього захисного корпусу – вуглецева сталь

Таблиця Г.2

Г.2. Геометричні та масові параметри електротепломеханічної системи для перемішування та підігріву

Елемент системи	Параметр	Примітка
Вал	Довжина – 0,7 м Діаметр зовнішній – 0,028 м Діаметр внутрішній – 0,02 м	Маса – 7 кг
Лопать	Довжина – 0,1 м Товщина – 0,015 м Висота – 0,1 м Кут нахилу лопаті – 45° Кількість лопатей – 4 шт	Матеріал лопаті – вуглецева сталь Маса однієї лопаті – 1 кг

Г.3. Технічна характеристика мінеральної вати

Frame-R37 100 mm  ISOVER SAINT-GOBAIN	
Щільність матеріалу, кг/м ³	15
Товщина, мм	100
Теплопровідність мінеральної вати, Вт/(м·К)	0,04
Термічний опір мінеральної вати, (К·м ²)/Вт	2,70
Короткочасне поглинання вологи, кг/м ³	≤0,3
Реакція на вогонь	Негорюча

Таблиця Г.4

Г.4. Технічна характеристика електричного нагрівального кабелю із вуглецевого волокна з ізоляцією із кремнійорганічної гуми

Марка кабелю	КН141
Зовнішній діаметр кабелю, мм	3
Товщина ізоляції, мм	1
Діаметр нагрівальної спіралі, мм	1
Напруга на пробій ізоляції, кВ, не менше	4,0
Електричний опір нагрівальної спіралі, Ом/м	141
Маса ізоляції, кг/м	0,008
Маса нагрівальної спіралі, кг/м	0,002
Питома теплоємність нагрівальної спіралі, кДж/(кг·К)	1,8
Питома теплоємність ізоляції, кДж/(кг·К)	4,9
Напруга живлення, В	АС 220
Довжина кабелю у одній лопаті мішалки, м	5
Потужність кабелю у одній лопаті мішалки, Вт	68,6
Струм, А	0,31

Г.5. Розрахунок та вибір пуско-захисного електрообладнання для однофазного асинхронного електродвигуна

Таблиця Г.5

Технічна характеристика електродвигуна

Марка електродвигуна	Techtop MY 631-4 B14
Номинальна потужність на валу P_n , кВт	0,12
Номинальна частота обертання $n_{ном}$, об/хв	1400
Номинальна напруга U_n , В	220
Коефіцієнт корисної дії η , %	55
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$	0,98
Кратність пускового моменту μ_n	0,7
Кратність пускового струму, K_i	2,5
Кратність максимального моменту μ_{max}	1,75
Маса, кг	3,4
Пусковий конденсатор, μF	8
Момент інерції ротора електродвигуна, $кг \cdot м^2$	0,000298
Клас ізоляції	F

Таблиця Г.6

Технічна характеристика редуктора

Марка редуктора	NMRV40-40
Передаточне число	40
Крутний момент, Нм	35
Кількість залитого масла, л	0,81
Вага, кг	2,3
Матеріал корпусу	Алюміній

Г.5.1. Розрахунок номінального та пускового струмів однофазного асинхронного електродвигуна

Номінальний струм однофазного електродвигуна:

$$I_{н.дв} = \frac{P_n}{U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{120}{220 \cdot 0,98 \cdot 0,55} = 1,01 A, \quad (Г.1)$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна, Вт; U_n – номінальна напруга мережі живлення, В; η – номінальний коефіцієнт корисної дії електродвигуна; $\cos \varphi$ – номінальний коефіцієнт потужності електродвигуна.

Пусковий струм електродвигуна:

$$I_n = K_i \cdot I_{н.дв} = 2,5 \cdot 1,01 = 2,525 \text{ A}, \quad (\text{Г.2})$$

де K_i – кратність пускового струму електродвигуна.

Г.5.2. Вибір автоматичного вимикача для керування і захисту однофазного асинхронного електродвигуна.

Автоматичний вимикач вибираю за такими умовами:

За номінальною напругою автоматичного вимикача:

$$U_{н.а} \geq U_{м}, \quad 220\text{В} = 220\text{В}, \quad (\text{Г.3})$$

де $U_{н.а}$ – номінальна напруга автоматичного вимикача, В; $U_{м}$ – номінальна напруга мережі живлення, В.

За номінальним струмом автоматичного вимикача:

$$I_{н.а} \geq I_{н.дв}, \quad 6\text{А} > 1,01\text{А}, \quad (\text{Г.4})$$

де $I_{н.а}$ – номінальний струм автоматичного вимикача, А; $I_{н.дв}$ – номінальний струм керованого (захищуваного) електродвигуна, А.

За номінальним струмом розчіплювачів:

$$I_{н.р} \geq I_{н.дв}, \quad 6\text{А} > 1,01\text{А}, \quad (\text{Г.5})$$

де $I_{н.р}$ – номінальний струм розчіплювача автоматичного вимикача, А; $I_{н.дв}$ – номінальний струм керованого(захищуваного) електродвигуна, А.

За кратністю струму відсічки $K_{відс} = 10$.

За розрахунковими даними обрано автоматичний вимикач серії ВА-47-29-100010РУХЛЗ з номінальним струмом 6 А, одним полюсом з розчіплювачем електромагнітного типу, без допоміжних розчіплювачів та контактів, ручним приводом стаціонарного виконання, допоміжні механізми відсутні, використання у закритих приміщеннях без опалення, для помірно-холодного клімату.

Перевірка вибраного автоматичного вимикача за умовою:

$$I_{відс} = K_{відс} \cdot I_{н.розч} \geq K_з \cdot K_{ру} \cdot K_{рнс} \cdot K_i \cdot I_{н.дв}, \quad (\text{Г.6})$$

$$I_{відс} = 10 \cdot 6 \geq 1,1 \cdot 1,25 \cdot 1,2 \cdot 2,5 \cdot 1,01 = 60 \text{ А} > 4,16 \text{ А},$$

де $I_{відс}$ – струм відсічки електромагнітного розчіплювача, А; $I_{н.розч}$ –

номінальний струм електромагнітного розчіплювача, A ; K_z – коефіцієнт запасу, який рівний 1,1; K_{py} – коефіцієнт, що враховує розкид струмів спрацювання електромагнітних розчіплювачів рівний 1,25; K_{pnc} – коефіцієнт розкиду пускового струму електродвигуна, рівний 1,2.

Г.5.3. Вибір електромагнітного пускача для керування однофазним асинхронним електродвигуном

Вибір електромагнітного пускача для дистанційного вмикання і вимикання однофазного асинхронного електродвигуна виконується згідно таких умов:

За номінальною напругою пускача

$$U_{н.п} \geq U_{м} \quad 220B = 220B, \quad (Г.7)$$

де $U_{н.п}$ – номінальна напруга електромагнітного пускача, B ; $U_{м}$ – номінальна напруга мережі живлення, B .

За номінальним робочим струмом пускача

$$I_{н.р.п} \geq I_{н.дв}, \quad 10A > 10,1A, \quad (Г.8)$$

де $I_{н.р.п}$ – номінальний робочий струм електромагнітного пускача, A ;

За призначенням – нереверсивний.

За ступенем захисту від дії навколишнього середовища – IP54, без кнопок та сигнальних ламп. За кількістю допоміжних контактів – 1 замикаючий контакт.

За кліматичним виконанням УХЛЗ.

За родом струму та напругою котушки електромагнітного пускача

$$U_{к.п} = U_{кер}, \quad 220B = 220B, \quad (Г.9)$$

де $U_{к.п}$ – номінальна напруга котушки електромагнітного пускача, B ;

$U_{кер}$ – напруга кола керування, B .

За стійкістю контактів головного кола проти комутаційних спрацювань залежно від частоти вмикань пускача, категорії застосування і необхідного строку його служби (6–10 років) – виконання B (від 120 до 400 циклів за добу). Електромагнітний пускач LC1 D0910. Магнітний пускач на 10 A без реле,

нереверсивний, IP54 без кнопок, змінного струму, напругою 220 В, помірно-холодного клімату, для закритих не опалювальних приміщень [173].

Вибраний електромагнітний пускач необхідно перевірити на можливість його роботи в категорії застосування АС-3. У категорії застосування АС-3 магнітний пускач повинен включати в нормальному режимі комутації струм

$$I_0 = 6 \cdot I_{н.р.н} \geq I_{н.дв} = 6 \cdot 10A = 60A > 2,525A, \quad (Г.10)$$

де $I_{н.р.н}$ – номінальний робочий струм електромагнітного пускача, А;

Г.5.4. Вибір запобіжника для захисту кола керування електромагнітного пускача

Запобіжник для захисту кола керування електромагнітного пускача слід вибирати за такими умовами:

За номінальною напругою запобіжника $U_{з.н}$, яка повинна бути не меншою номінальної напруги мережі U_M :

$$U_{з.н} \geq U_M, \quad 220В = 220В. \quad (Г.11)$$

За номінальним струмом основи $I_{н.о}$, який повинен бути не меншим номінального струму плавкої вставки $I_{н.н.в}$, а останній – не меншим розрахункового струму $I_{р.н.в} = 0,5A$ тобто:

$$I_{н.о} \geq I_{н.н.в} \geq I_{р.н.в}, \quad 10A > 3A > 0,5A \quad (Г.12)$$

Розрахунковий струм плавкої вставки запобіжника складається з споживаного струму котушки електромагнітного реле, який знаходимо за формулою:

$$I_{р.н.в} = \frac{S_K}{U_M} = \frac{110}{220} = 0,5A, \quad (Г.13)$$

де S_K – потужність при спрацюванні котушки магнітного пускача, $S_K = 110ВА$.

За кліматичним виконанням і категорією розміщення – УХЛ 3 за ГОСТ 15150-69 і ГОСТ 15543.1-89.

Згідно проведених розрахунків обрано запобіжник плавкий трубчастий ППТ-10УХЛЗ з номінальним струмом 10А, для помірно-холодного клімату, закритих неопалювальних приміщень.[173]. Вставка трубчаста фарфорова ВТФ-ЗУХЛЗ з номінальним струмом 3А, для помірно-холодного клімату, закритих неопалювальних приміщень [173]. Робоче положення запобіжника – вертикальне або горизонтальне. Номінальний режим роботи запобіжників – тривалий. Контактні з'єднання запобіжників відповідають 3-у класу за ГОСТ 10434-82, а найбільша допустима температура нагріву виводів запобіжника при протіканні номінального струму не повинна перевищувати 130°C. Ступінь захисту запобіжників IP00 за ГОСТ 14255-69.

Г.5.5. Вибір струмового електротеплового реле для захисту однофазного асинхронного електродвигуна

Вибір струмового електротеплового реле для захисту однофазного асинхронного електродвигуна від симетричних перевантажень недопустимої тривалості виконано згідно умов:

За номінальним струмом реле:

$$I_{н.т.р} \geq I_{н.дв}, \quad 25A > 1,01A, \quad (Г.14)$$

де $I_{н.т.р}$ – номінальний струм електротеплового реле, А; $I_{н.дв}$ – номінальний струм електродвигуна, А.

За номінальним струмом двигуна:

$$I_{рег.мак.т.р} \geq I_{н.дв} \geq I_{рег.мін.т.р}, \quad 0,95A > 1,01A > 1,6A, \quad (Г.15)$$

де $I_{рег.мак.т.р}$ і $I_{рег.мін.т.р}$ – відповідно максимальне і мінімальне значення діапазону регулювання струму не спрацювання теплового реле, А

Для захисту електричного двигуна згідно розрахунків обрано електротеплове реле серії РТЛ-1006УХЛ4 з номінальним струмом 25 А, приєднання до магнітного пускача, з одним розмикаючим контактом, робота у помірно-холодному кліматі.

Г.6. Технічна характеристика трансформаторів струму

Split core current transformer

YHDC®

Model: SCT013-030

Characteristic:

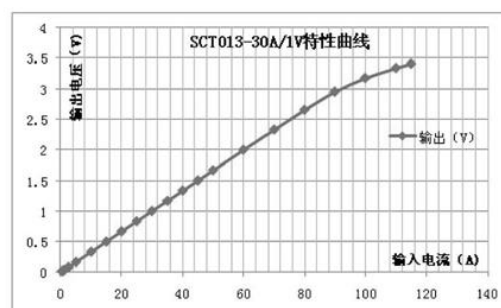
Opening size 13mmx13mm, Compatible to foreign products, leading wire 1 metre, standard $\Phi 3.5$ three core plug output, current & voltage two types of output. (Patent No. ZL 2015 3 0060067.X)



Technical indicators:

Hanging installation, leading wire output
Fire resistance property: UL94-V0
Standard: GB1208-2006
Work temperature: $-25^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$
Storage temperature: $-30^{\circ}\text{C} \sim +90^{\circ}\text{C}$
Work voltage: 660V
Frequency range: 50Hz-1KHz
Dielectric strength: 3.5KV 50Hz 1min

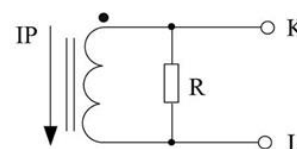
Characteristic curve in different load volt-ampere:



Electric parameter:

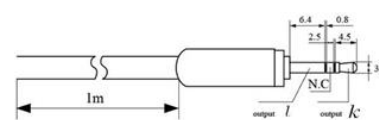
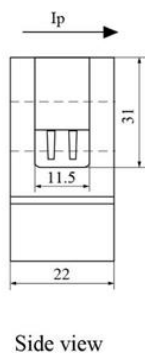
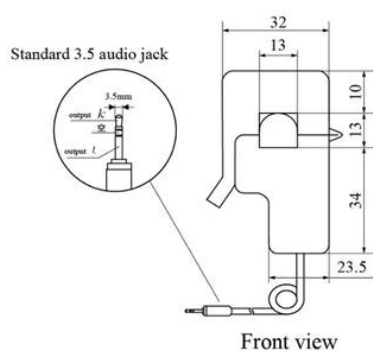
Rated input(rms)	30	A
Max.Input	30	A
Rated output	1	V
Accuracy	± 1	%
Linearity	≤ 0.2	%
Weight	50	g

Wiring diagram:



Built-in with sampling resistance voltage output type

Outline size diagram(in mm):



Standard three core jack schematic diagram

Г.7. Технічна характеристика датчика температури та вологості



For more products visit our website <http://www.sunrom.com>

Document: Datasheet

Date: 20-Jun-12

Model #: 3732

Product's Page: www.sunrom.com/p-1141.html

DHT11 - Humidity and Temperature Sensor

The DHT11 is a basic, low-cost digital temperature and humidity sensor. It uses a capacitive humidity sensor and a thermistor to measure the surrounding air, and spits out a digital signal on the data pin (no analog input pins needed).

Its fairly simple to use, but requires careful timing to grab data. The only real downside of this sensor is you can only get new data from it once every 2 seconds.

Features

- Full range temperature compensated
- Relative humidity and temperature measurement
- Calibrated digital signal
- Outstanding long-term stability
- Extra components not needed
- Long transmission distance
- Low power consumption
- 4 pins packaged and fully interchangeable



Details

This sensor includes a resistive-type humidity measurement component and an NTC temperature measurement component, and connects to a high-performance 8-bit microcontroller, offering excellent quality, fast response, anti-interference ability and cost-effectiveness. Each DHT11 element is strictly calibrated in the laboratory that is extremely accurate on humidity calibration. The calibration coefficients are stored as programmes in the OTP memory, which are used by the sensor's internal signal detecting process.

The single-wire serial interface makes system integration quick and easy. Its small size, low power consumption and up-to-20 meter signal transmission making it the best choice for various applications, including those most demanding ones. The component is 4-pin single row pin package.



Specifications

Item	Measurement Range	Humidity Accuracy	Temperature Accuracy	Resolution	Package
DHT11	20-90%RH 0-50 °C	± 5%RH	± 2°C	1	4 Pin Single Row

Parameters	Conditions	Minimum	Typical	Maximum
Humidity				
Resolution		1%RH	1%RH	1%RH
			8 Bit	
Repeatability			± 1%RH	
Accuracy	25°C		± 4%RH	
	0-50°C			± 5%RH
Interchangeability	Fully Interchangeable			
Measurement Range	0°C	30%RH		90%RH
	25°C	20%RH		90%RH
	50°C	20%RH		80%RH
Response Time (Seconds)	1/e(63%)25°C, 1m/s Air	6 S	10 S	15 S
Hysteresis			± 1%RH	
Long-Term Stability	Typical		± 1%RH/year	
Temperature				
Resolution		1°C	1°C	1°C
		8 Bit	8 Bit	8 Bit
Repeatability			± 1°C	
Accuracy		± 1°C		± 2°C
Measurement Range		0°C		50°C
Response Time (Seconds)	1/e(63%)	6 S		30 S

Item	Condition	Min	Typical	Max	Unit
Power supply	DC	3	5	5.5	V
Current supply	Measuring	0.5		2.5	mA
	Stand-by	100	Null	150	uA
	Average	0.2	Null	1	mA

Г.8. Технічна характеристика датчиків температури

DS18B20

Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

General Description

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

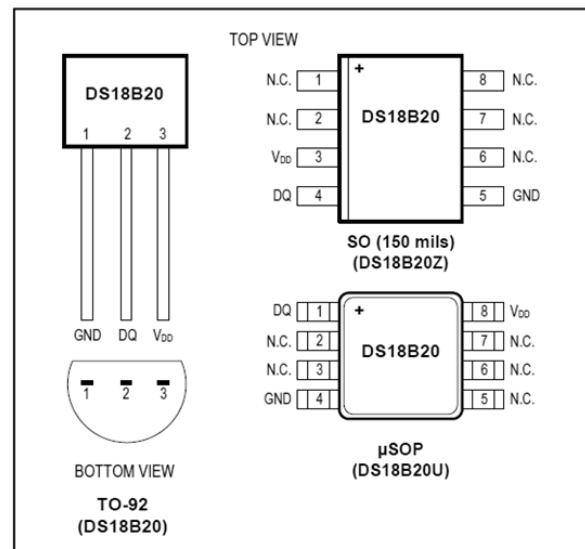
Applications

- Thermostatic Controls
- Industrial Systems
- Consumer Products
- Thermometers
- Thermally Sensitive Systems

Benefits and Features

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Reduce Component Count with Integrated Temperature Sensor and EEPROM
 - Measures Temperatures from -55°C to +125°C (-67°F to +257°F)
 - ±0.5°C Accuracy from -10°C to +85°C
 - Programmable Resolution from 9 Bits to 12 Bits
 - No External Components Required
- Parasitic Power Mode Requires Only 2 Pins for Operation (DQ and GND)
- Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications with Multidrop Capability
 - Each Device Has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in On-Board ROM
- Flexible User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings with Alarm Search Command Identifies Devices with Temperatures Outside Programmed Limits
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin µSOP, and 3-Pin TO-92 Packages

Pin Configurations



Ordering Information appears at end of data sheet.

1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

DS18B20

Programmable Resolution
1-Wire Digital Thermometer

Absolute Maximum Ratings

Voltage Range on Any Pin Relative to Ground -0.5V to +6.0V
 Operating Temperature Range -55°C to +125°C

Storage Temperature Range -55°C to +125°C
 Solder Temperature Refer to the IPC/JEDEC
 J-STD-020 Specification.

These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

DC Electrical Characteristics

(-55°C to +125°C; $V_{DD} = 3.0V$ to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V_{DD}	Local power (Note 1)	+3.0		+5.5	V
Pullup Supply Voltage	V_{PU}	Parasite power	+3.0		+5.5	V
		Local power	+3.0		V_{DD}	
Thermometer Error	t_{ERR}	-10°C to +85°C			±0.5	°C
		-30°C to +100°C			±1	
		-55°C to +125°C			±2	
Input Logic-Low	V_{IL}	(Notes 1, 4, 5)	-0.3		+0.8	V
Input Logic-High	V_{IH}	Local power	+2.2	The lower of 5.5 or $V_{DD} + 0.3$		V
		Parasite power	+3.0			
Sink Current	I_L	$V_{I/O} = 0.4V$	4.0			mA
Standby Current	I_{DDS}	(Notes 7, 8)		750	1000	nA
Active Current	I_{DD}	$V_{DD} = 5V$ (Note 9)		1	1.5	mA
DQ Input Current	I_{DQ}	(Note 10)		5		μA
Drift		(Note 11)		±0.2		°C

Note 1: All voltages are referenced to ground.

Note 2: The Pullup Supply Voltage specification assumes that the pullup device is ideal, and therefore the high level of the pullup is equal to V_{PU} . In order to meet the V_{IH} spec of the DS18B20, the actual supply rail for the strong pullup transistor must include margin for the voltage drop across the transistor when it is turned on; thus: $V_{PU_ACTUAL} = V_{PU_IDEAL} + V_{TRANSISTOR}$.

Note 3: See typical performance curve in Figure 1. Thermometer Error limits are 3-sigma values.

Note 4: Logic-low voltages are specified at a sink current of 4mA.

Note 5: To guarantee a presence pulse under low voltage parasite power conditions, V_{ILMAX} may have to be reduced to as low as 0.5V.

Note 6: Logic-high voltages are specified at a source current of 1mA.

Note 7: Standby current specified up to +70°C. Standby current typically is 3μA at +125°C.

Note 8: To minimize I_{DDs} , DQ should be within the following ranges: $GND \leq DQ \leq GND + 0.3V$ or $V_{DD} - 0.3V \leq DQ \leq V_{DD}$.

Note 9: Active current refers to supply current during active temperature conversions or EEPROM writes.

Note 10: DQ line is high ("high-Z" state).

Note 11: Drift data is based on a 1000-hour stress test at +125°C with $V_{DD} = 5.5V$.

DS18B20

Programmable Resolution
1-Wire Digital Thermometer

AC Electrical Characteristics—NV Memory

(-55°C to +125°C; $V_{DD} = 3.0V$ to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
NV Write Cycle Time	t_{WR}			2	10	ms
EEPROM Writes	N_{EEWR}	-55°C to +55°C	50k			writes
EEPROM Data Retention	t_{EEDR}	-55°C to +55°C	10			years

AC Electrical Characteristics

(-55°C to +125°C; $V_{DD} = 3.0V$ to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Temperature Conversion Time	t_{CONV}	9-bit resolution	(Note 12)		93.75	ms
		10-bit resolution			187.5	
		11-bit resolution			375	
		12-bit resolution			750	
Time to Strong Pullup On	t_{SPON}	Start convert T command issued			10	μs
Time Slot	t_{SLOT}	(Note 12)	60		120	μs
Recovery Time	t_{REC}	(Note 12)	1			μs
Write 0 Low Time	t_{LOW0}	(Note 12)	60		120	μs
Write 1 Low Time	t_{LOW1}	(Note 12)	1		15	μs
Read Data Valid	t_{RDV}	(Note 12)			15	μs
Reset Time High	t_{RSTH}	(Note 12)	480			μs
Reset Time Low	t_{RSTL}	(Notes 12, 13)	480			μs
Presence-Detect High	t_{PDHIGH}	(Note 12)	15		60	μs
Presence-Detect Low	t_{PDLOW}	(Note 12)	60		240	μs
Capacitance	$C_{IN/OUT}$				25	pF

Note 12: See the timing diagrams in Figure 2.

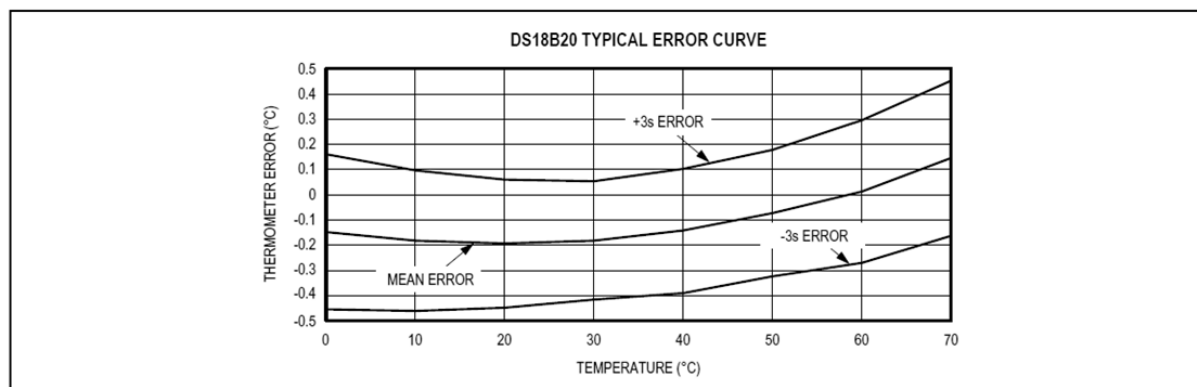
Note 13: Under parasite power, if $t_{RSTL} > 960\mu s$, a power-on reset can occur.

Figure 1. Typical Performance Curve

Г.9. Технічна характеристика диференційного датчику тиску

Freescale Semiconductor
Technical Data

MPX5010
Rev 11, 01/2007

Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated

The MPX5010/MPXV5010G series piezoresistive transducers are state-of-the-art monolithic silicon pressure sensors designed for a wide range of applications, but particularly those employing a microcontroller or microprocessor with A/D inputs. This transducer combines advanced micromachining techniques, thin-film metallization, and bipolar processing to provide an accurate, high level analog output signal that is proportional to the applied pressure.

Features

- 5.0% Maximum Error over 0° to 85°C
- Ideally Suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems
- Durable Epoxy Unibody and Thermoplastic (PPS) Surface Mount Package
- Temperature Compensated over -40° to +125°C
- Patented Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Available in Differential and Gauge Configurations
- Available in Surface Mount (SMT) or Through-hole (DIP) Configurations

Application Examples

- Hospital Beds
- HVAC
- Respiratory Systems
- Process Control

ORDERING INFORMATION

Device Type	Options	Case No.	MPX Series Order No.	Packing Options	Device Marking
SMALL OUTLINE PACKAGE (MPXV5010G SERIES)					
Basic Elements	Gauge, Element Only, SMT	482	MPXV5010G6U	Rails	MPXV5010G
	Gauge, Element Only, DIP	482B	MPXV5010G7U	Rails	MPXV5010G
Ported Elements	Gauge, Axial Port, SMT	482A	MPXV5010GC6U	Rails	MPXV5010G
	Gauge, Axial Port, DIP	482C	MPXV5010GC7U	Rails	MPXV5010G
	Gauge, Axial Port, SMT	482A	MPXV5010GC6T1	Tape & Reel	MPXV5010G
	Gauge, Side Port, SMT	1369	MPXV5010GP	Trays	MPXV5010G
	Gauge, Dual Port, SMT	1351	MPXV5010DP	Trays	MPXV5010G
UNIBODY PACKAGE (MPX2202 SERIES)					
Basic Element	Differential	867	MPX5010D	—	MPXV5010D
Ported Elements	Differential, Gauge	867C	MPX5010DP	—	MPXV5010DP
	Gauge	867B	MPX5010GP	—	MPXV5010GP
	Gauge, Axial	867E	MPX5010GS	—	MPXV5010D
	Gauge, Axial PC Mount	867F	MPX5010GSX	—	MPXV5010D

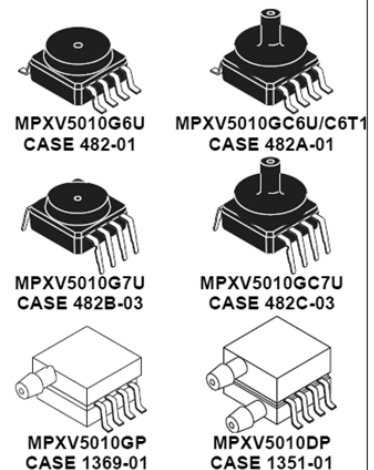
UNIBODY PACKAGES



MPX5010 MPXV5010G SERIES

**INTEGRATED
PRESSURE SENSOR**
0 to 10 kPa (0 to 1.45 psi)
0.2 to 4.7 V OUTPUT

SMALL OUTLINE PACKAGE



UNIBODY PACKAGE PIN NUMBERS⁽¹⁾

1	V _{out}	4	N/C
2	Gnd	5	N/C
3	V _S	6	N/C

1. Pins 4, 5, and 6 are internal device connections. Do not connect to external circuitry or ground. Pin 1 is noted by the notch in the lead.

SMALL OUTLINE PACKAGE PIN NUMBERS⁽¹⁾

1	N/C	5	N/C
2	V _S	6	N/C
3	Gnd	7	N/C
4	V _{out}	8	N/C

1. Pins 1, 5, 6, 7, and 8 are internal device connections. Do not connect to external circuitry or ground. Pin 1 is noted by the notch in the lead.

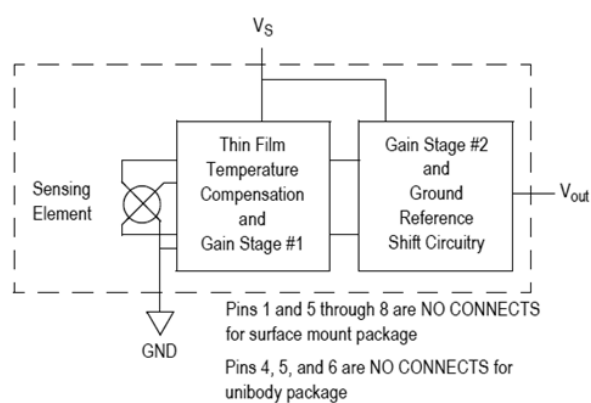


Figure 1. Fully Integrated Pressure Sensor Schematic

Table 1. Maximum Ratings⁽¹⁾

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Pressure ($P_1 > P_2$)	P_{max}	75	kPa
Storage Temperature	T_{stg}	-40 to +125	°C
Operating Temperature	T_A	-40 to +125	°C

1. Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

Table 2. Operating Characteristics ($V_S = 5.0$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, $P_1 > P_2$. Decoupling circuit shown in Figure 3 required to meet specification.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range ⁽¹⁾	P_{OP}	0	—	10	kPa
Supply Voltage ⁽²⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	Vdc
Supply Current	I_o	—	5.0	10	mAdc
Minimum Pressure Offset ⁽³⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{off}	0	0.2	0.425	Vdc
Full Scale Output ⁽⁴⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{FSO}	4.475	4.7	4.925	Vdc
Full Scale Span ⁽⁵⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{FSS}	4.275	4.5	4.725	Vdc
Accuracy ⁽⁶⁾	—	—	—	± 5.0	% V_{FSS}
Sensitivity	V/P	—	450	—	mV/kPa
Response Time ⁽⁷⁾	t_R	—	1.0	—	ms
Output Source Current at Full Scale Output	I_{O+}	—	0.1	—	mAdc
Warm-Up Time ⁽⁸⁾	—	—	20	—	ms
Offset Stability ⁽⁹⁾	—	—	± 0.5	—	% V_{FSS}

1. 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.

2. Device is ratiometric within this specified excitation range.

3. Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.

4. Full Scale Output (V_{FSO}) is defined as the output voltage at the maximum or full rated pressure.

5. Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.

6. Accuracy (error budget) consists of the following:

- Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.
- Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
- Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C .
- TcSpan: Output deviation over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .
- TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .
- Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of V_{FSS} , at 25°C .

7. Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.

8. Warm-up Time is defined as the time required for the product to meet the specified output voltage after the Pressure has been stabilized.

9. Offset Stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

Table 3. Mechanical Characteristics

Characteristics	Typ	Unit
Weight, Basic Element (Case 867)	4.0	grams
Weight, Basic Element (Case 482)	1.5	grams

ON-CHIP TEMPERATURE COMPENSATION, CALIBRATION AND SIGNAL CONDITIONING

The performance over temperature is achieved by integrating the shear-stress strain gauge, temperature compensation, calibration and signal conditioning circuitry onto a single monolithic chip.

Figure 2 illustrates the Differential or Gauge configuration in the basic chip carrier (Case 482). A fluorosilicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the sensor diaphragm.

The MPX5010 and MPXV5010G series pressure sensor operating characteristics, and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media, other than dry air, may have adverse effects on

sensor performance and long-term reliability. Contact the factory for information regarding media compatibility in your application.

Figure 3 shows the recommended decoupling circuit for interfacing the integrated sensor to the A/D input of a microprocessor or microcontroller. Proper decoupling of the power supply is recommended.

Figure 4 shows the sensor output signal relative to pressure input. Typical, minimum, and maximum output curves are shown for operation over a temperature range of 0° to 85°C using the decoupling circuit shown in Figure 3. The output will saturate outside of the specified pressure range.

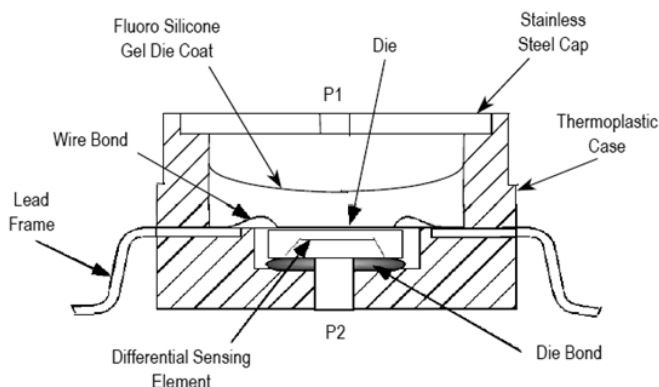


Figure 2. Cross-Sectional Diagram SOP (not to scale)

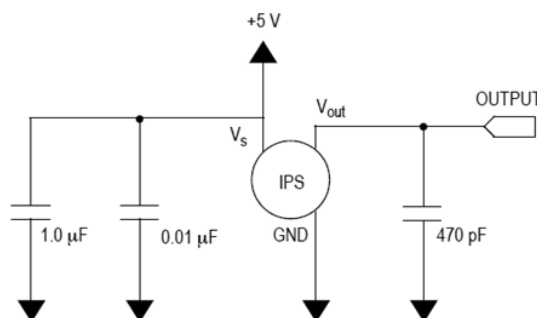


Figure 3. Recommended Power Supply Decoupling and Output Filtering
(For additional output filtering, please refer to Application Note AN1646.)

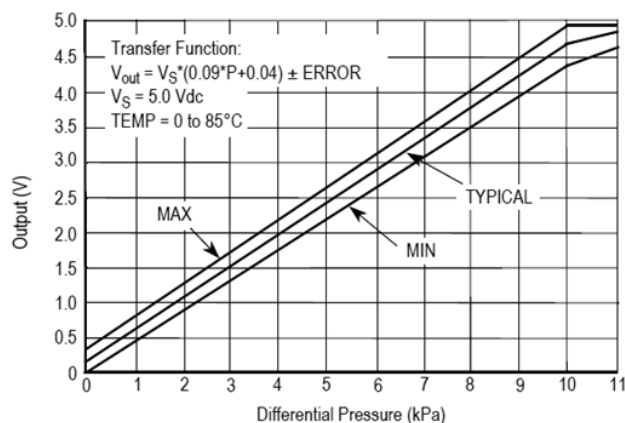


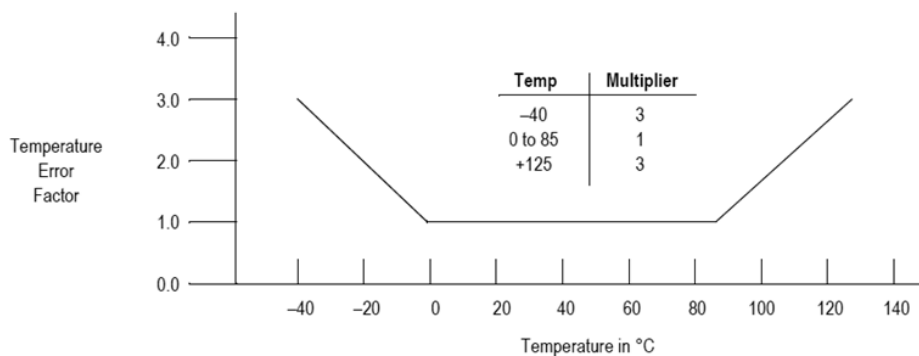
Figure 4. Output versus Pressure Differential

Transfer Function (MPX5010, MPXV5010G)

Nominal Transfer Value: $V_{out} = V_S \times (0.09 \times P + 0.04)$
 $\pm (\text{Pressure Error} \times \text{Temp. Factor} \times 0.09 \times V_S)$
 $V_S = 5.0 \text{ V} \pm 0.25 \text{ Vdc}$

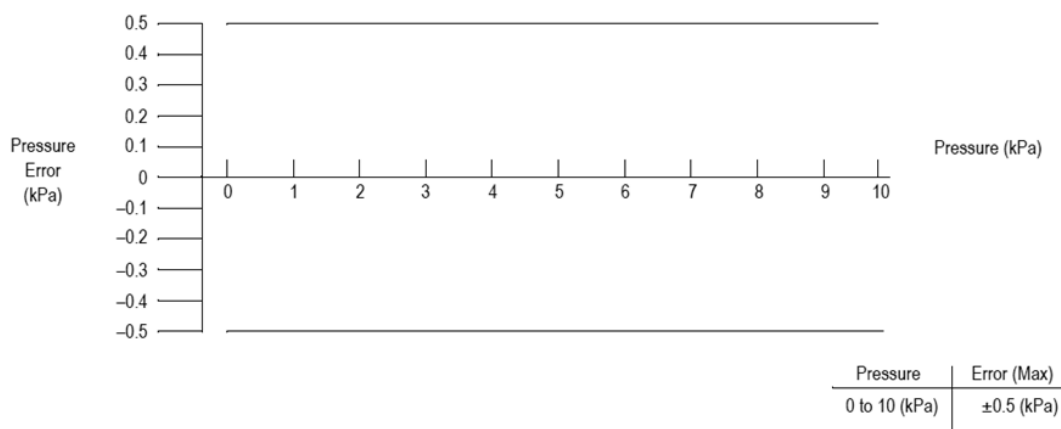
Temperature Error Band

MPX5010, MPXV5010G SERIES



NOTE: The Temperature Multiplier is a linear response from 0° to -40°C and from 85° to 125°C.

Pressure Error Band



**Г.10. Основні технічні характеристики портативного шахтного
газоаналізатора метану**

Таблиця Г.7

Параметр	Значення
Тип газоаналізатора	АМТ-03
Реєстрація газів	Метан (CH ₄)
Діапазон показань, % об.	0 – 100
Основна абсолютна похибка, % об.:	
- для діапазону 0 – 2,5	± 0,1
- для діапазону 5 – 100	± 3,0
Час прогріву, хв, не більше	2
Час роботи без підзарядки, год, не менше	10
Температура оточуючого середовища, °С	-10...+40
Відносна вологість, %	до 90
Ступінь захисту корпусу	IP54
Маса, кг	0,24

Г.11. Технічна характеристика датчика метану

Winsen

炜盛科技 Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd

www.winsensor.com

MQ-4 Semiconductor Sensor for Flammable Gas

Profile

Sensitive material of MQ-4 gas sensor is SnO_2 , which with lower conductivity in clean air. When the target flammable gas exist, the sensor's conductivity gets higher along with the gas concentration rising. Users can convert the change of conductivity to correspond output signal of gas concentration through a simple circuit.

MQ-4 gas sensor has high sensitivity to methane, also has anti-interference to alcohol and other gases.

Features

It has good sensitivity to methane in wide range, and has advantages such as long lifespan, low cost and simple drive circuit &etc.

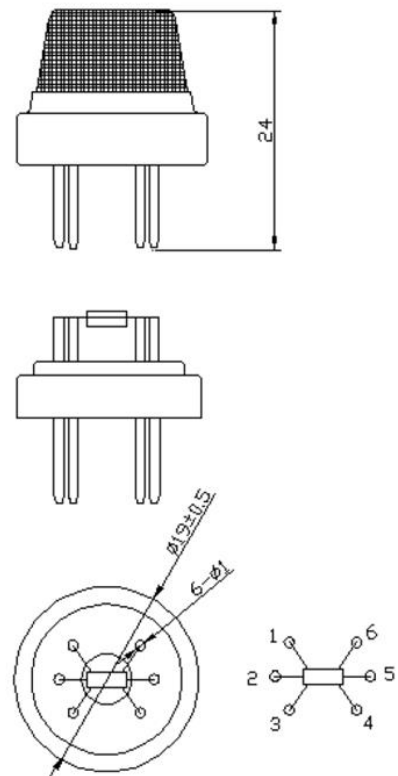
Main Applications

It is widely used in domestic gas leakage alarm, industrial flammable gas alarm and portable gas detector.

Technical Parameters

Stable.1

Model			MQ-4
Sensor Type			Semiconductor
Standard Encapsulation			Bakelite, Metal cap
Target Gas			Methane
Detection range			300~10000ppm(CH_4)
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	V_c	$\leq 24\text{V DC}$
	Heater Voltage	V_H	$5.0\text{V} \pm 0.1\text{V AC or DC}$
	Load Resistance	R_L	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	R_H	$26\Omega \pm 3\Omega$ (room tem.)
	Heater consumption	P_H	$\leq 950\text{mW}$
	Sensitivity	S	$R_s(\text{in air})/R_s(\text{in } 5000\text{ppm CH}_4) \geq 5$
	Output Voltage	V_s	$2.5\text{V} \sim 4.0\text{V}$ (in 5000ppm CH_4)
	Concentration Slope	α	$\leq 0.6(R_{5000\text{ppm}}/R_{1000\text{ppm CH}_4})$
Standard test conditions	Tem. Humidity		$20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}; 55\% \pm 5\% \text{RH}$
	Standard test circuit		$V_c: 5.0\text{V} \pm 0.1\text{V};$ $V_H: 5.0\text{V} \pm 0.1\text{V}$
	Preheat time		Over 48 hours


Fig1. Sensor Structure

Unit: mm

NOTE: Output voltage (V_s) is V_{RL} in test environment.

Tel: 86-371-67169097/67169670 Fax: 86-371-60932988

 Email: sales@winsensor.com

Basic Circuit

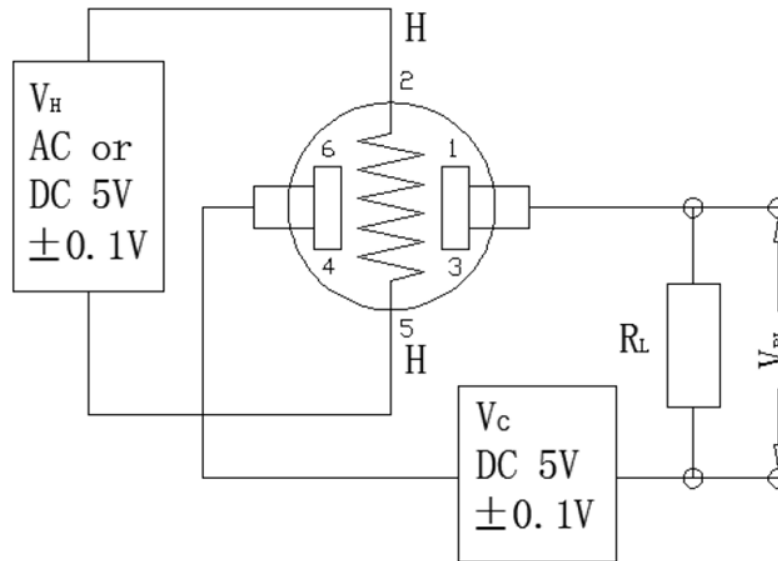


Fig2. MQ-4 Test Circuit

Instructions: The above fig is the basic test circuit of MQ-4. The sensor requires two voltage inputs: heater voltage (V_H) and circuit voltage (V_C). V_H is used to supply standard working temperature to the sensor and it can adopt DC or AC power, while V_{RL} is the voltage of load resistance R_L which is in series with sensor. V_C supplies the detect voltage to load resistance R_L and it should adopt DC power.

Description of Sensor Characters

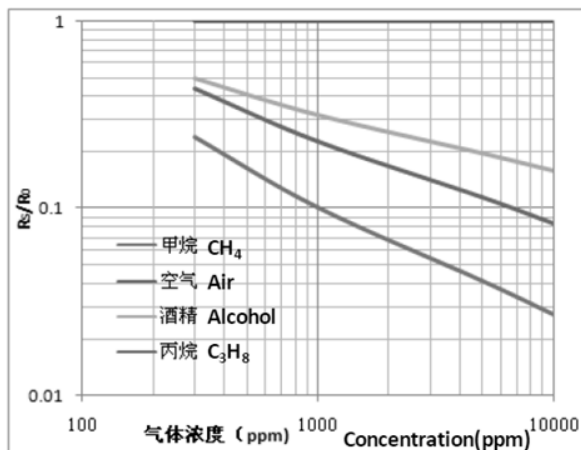


Fig3. Typical Sensitivity Curve

The ordinate is resistance ratio of the sensor (R_s/R_0), the abscissa is concentration of gases. R_s means resistance in target gas with different concentration, R_0 means resistance of sensor in dean air. All tests are finished under standard test conditions.

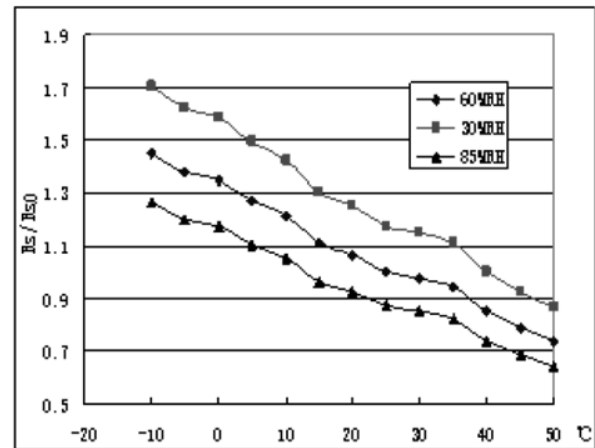


Fig4. Typical temperature/humidity characteristics

The ordinate is resistance ratio of the sensor (R_s/R_{50}). R_s means resistance of sensor in 5000ppm methane (CH_4) under different tem. and humidity. R_{50} means resistance of the sensor in 5000ppm methane under 20°C/55%RH.

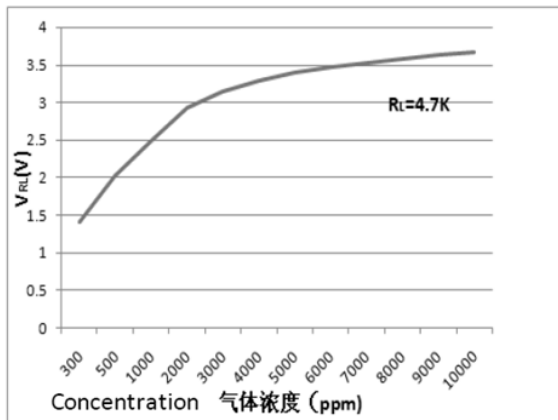

Fig5.Sensitivity Curve

Fig5 shows the V_{RL} in methane with different concentration. The resistance load R_L is 4.7 K Ω and the test is finished in standard test conditions.

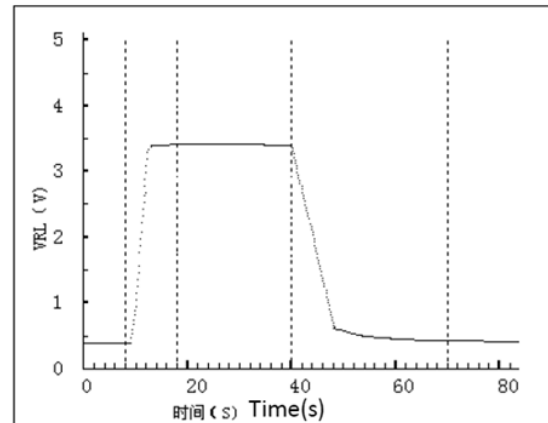
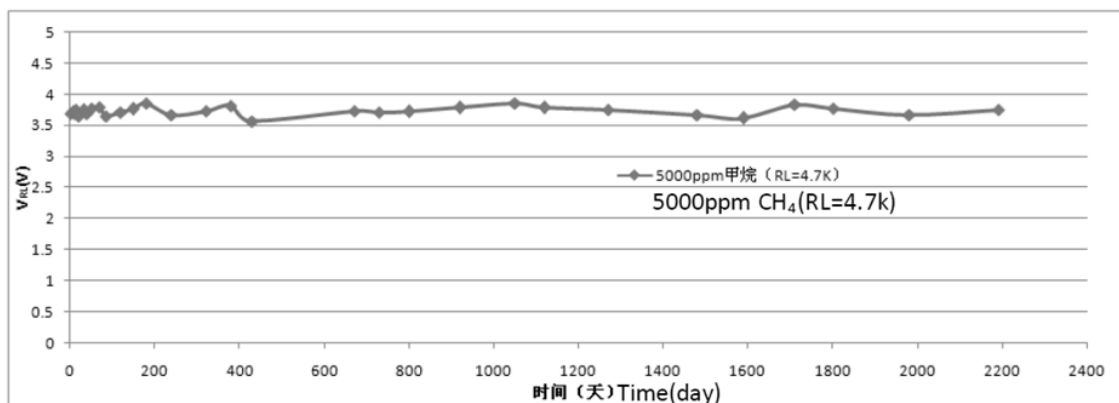

Fig6.Response and Resume

Fig5 shows the changing of V_{RL} in the process of putting the sensor into target gas and removing it out.


Fig7.long-term Stability

Test is finished in standard test conditions, the abscissa is observing time and the ordinate is V_{RL} .

Cautions

1. Following conditions must be prohibited

1.1 Exposed to organic silicon steam

Sensing material will lose sensitivity and never recover if the sensor absorbs organic silicon steam. Sensors must avoid exposing to silicon bond, fixture, silicon latex, putty or plastic contain silicon environment.

1.2 High Corrosive gas

If the sensors are exposed to high concentration corrosive gas (such as H_2S , SO_x , Cl_2 , HCl etc.), it will not only result in corrosion of sensors structure, also it cause sincere sensitivity attenuation.

1.3 Alkali, Alkali metals salt, halogen pollution

The sensors performance will be changed badly if sensors be sprayed polluted by alkali metals salt

Г.12. Технічна характеристика датчика вуглекислого газу

TECHNICAL DATA

MQ-135 GAS SENSOR

FEATURES

Wide detecting scope Fast response and High sensitivity
Stable and long life Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in air quality control equipments for buildings/offices, are suitable for detecting of NH₃, NO_x, alcohol, Benzene, smoke, CO₂, etc.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
R _L	Load resistance	can adjust	
R _H	Heater resistance	33Ω±5%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 800mw	

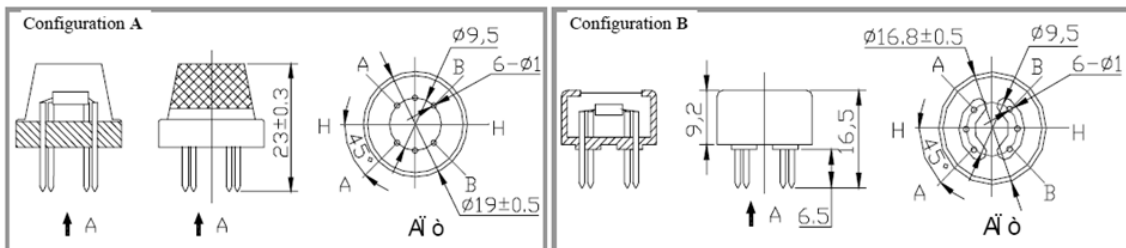
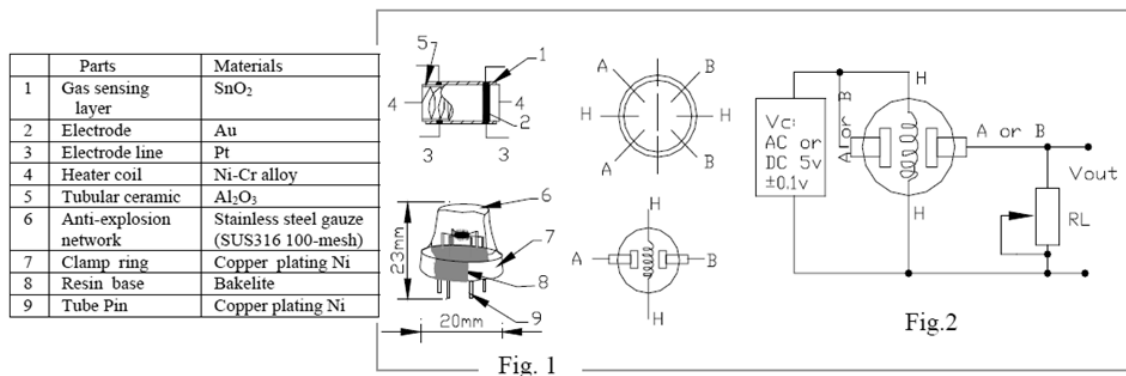
B. Environment condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T _{ao}	Using Tem	-10℃-45℃	minimum value is over 2%
T _{as}	Storage Tem	-20℃-70℃	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition) Oxygen concentration can affect sensitivity	

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remark 2
R _s	Sensing Resistance	30KΩ-200KΩ (100ppm NH ₃)	Detecting concentration scope
α (200/50) NH ₃	Concentration Slope rate	≤0.65	10ppm-300ppm NH ₃ 10ppm-1000ppm Benzene 10ppm-300ppm Alcohol
Standard Detecting Condition	Temp: 20℃±2℃ V _c : 5V±0.1 Humidity: 65%±5% V _H : 5V±0.1		
Preheat time	Over 24 hour		

D. Structure and configuration, basic measuring circuit



Structure and configuration of MQ-135 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro Al₂O₃ ceramic tube, Tin Dioxide (SnO₂) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive

components. The enveloped MQ-135 have 6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-135

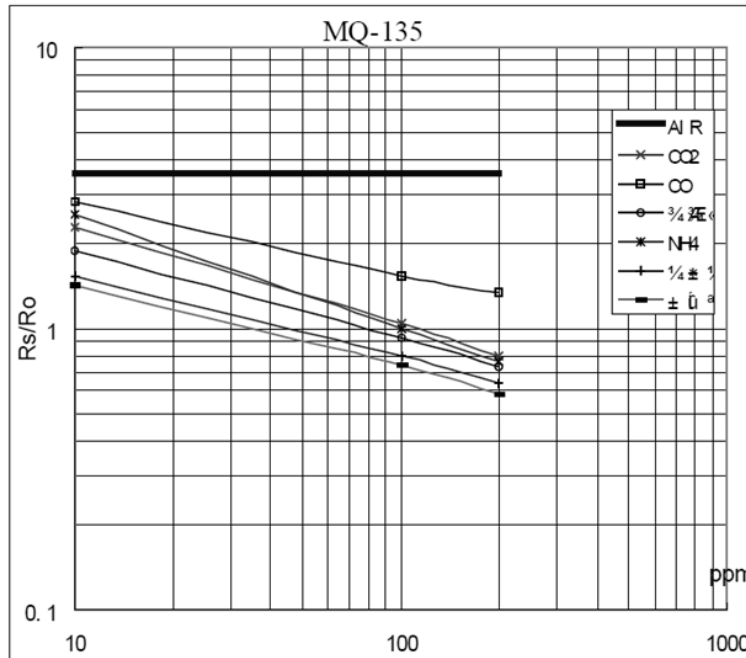


Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-135 for several gases.

in their: Temp: 20°C

Humidity: 65%

O₂ concentration 21%

RL=20kΩ

Ro: sensor resistance at 100ppm of NH₃ in the clean air.

Rs: sensor resistance at various concentrations of gases.

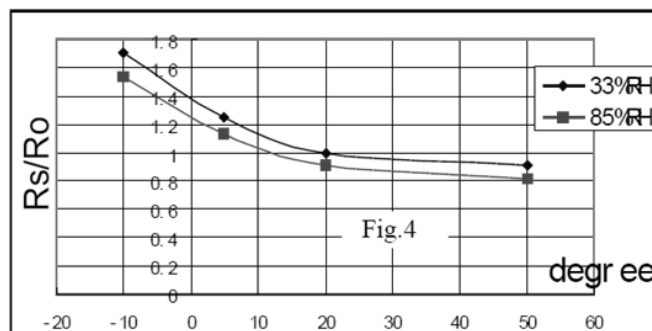


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-135 on temperature and humidity.

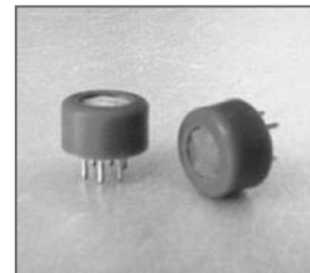
Ro: sensor resistance at 100ppm of NH₃ in air at 33%RH and 20 degree.

Rs: sensor resistance at 100ppm of NH₃ at different temperatures and humidities.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-135 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 100ppm NH₃ or 50ppm Alcohol concentration in air and use value of Load resistance that(R_L) about 20 KΩ(10KΩ to 47 KΩ).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.



Г.13. Технічна характеристика блоку живлення PeakTech 6225A

Cleaning the cabinet

Prior to cleaning the cabinet, withdraw the mains plug from the power outlet. Clean only with a damp, soft cloth and a commercially available mild household cleanser. Ensure that no water gets inside the equipment to prevent possible shorts and damage to the equipment.

2. Introduction

This switching power supply in modern design has been designed specifically for the service and education sectors. The four-digit LED display allows fast and accurate reading of the set values. The output voltage and current limit are hereby continuously in coarse and fine adjustment variable.

- Modern laboratory power supply in switch mode power supply technology
- 4-digit LED display for current and voltage
- Voltage and current preset
- output on and off
- Coarse (1V / 100mA) and fine adjustment (10mV / 1mA)
- Temperature-controlled fan
- constant current and short circuit protection
- 4mm safety sockets

3. Technical Data

Operation voltage:	115 / 240 V AC (+/- 10%); 50/60 Hz switchable extern
Protection:	constant current and short-circuit protection
Display:	2 x 4-Digits blue LED (7-Segment)
Safety:	Protection Class 1; EN-61010-1
Dimensions:	(WxHxD) 80 x 160 x 260 mm
Weight:	1,5 kg
Accessories:	Power cable and manual

PeakTech 6225A:

Output voltage:	0 ~ 30 V DC	
Output current:	0 ~ 5 A DC	
Line regulation:	$\leq 0,01\% \pm 1 \text{ mV}$	$\leq 0,2\% \pm 1 \text{ mA}$
Load regulation:	$\leq 0,01\% \pm 5 \text{ mV}$	$\leq 0,2\% \pm 5 \text{ mA}$
Ripple and noise:	$\leq 3 \text{ mV rms}$	$\leq 3 \text{ mA rms}$
Voltage indication accuracy:	$\pm 0,1 \% + 2 \text{ digits}$	
Current indication accuracy:	$\pm 0,1 \% + 2 \text{ digits}$	

PeakTech 6226:

Output voltage:	0 ~ 30 V DC	
Output current:	0 ~ 10 A DC	
Line regulation:	$\leq 0,02\% \pm 5 \text{ mV}$	$\leq 0,2\% \pm 1 \text{ mA}$
Load regulation:	$\leq 0,02\% \pm 10 \text{ mV}$	$\leq 0,5\% \pm 10 \text{ mA}$
Ripple and noise:	$\leq 10 \text{ mV rms}$	$\leq 10 \text{ mA rms}$
Voltage indication accuracy:	$\pm 0,5 \% + 5 \text{ digits}$	
Current indication accuracy:	$\pm 0,5 \% + 5 \text{ digits}$	



CERTIFICATE OF FACTORY CALIBRATION WERKSKALIBRIERSCHEIN

Wir bestätigen hiermit, dass alle PeakTech-Messgeräte ab Werk kalibriert geliefert werden und die in der Bedienungsanleitung genannten Spezifikationen erfüllen.

We hereby certify that all of our devices are calibrated at the factory and meet all specifications listed in our documentation.

Prüfling / Device under Test	DC Power Supply
Modell / Model	PeakTech P6225A
Seriennummer / Serial - Number	NO.565551~NO.566150
Datum der Kalibrierung / Calibration Date	June.2020
Temperatur / Environment Temperature	23.0°C ±0,5°C
Luftfeuchtigkeit / Humidity	35% ± 10% RH
Kalibriergeräte / Calibration Equipment	Agilent HP3468A
Kalibriert durch / Calibrated by:	IQC:Mr.Qihong Zhou

ДОДАТОК Д

Д.1. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактору (1 доба)

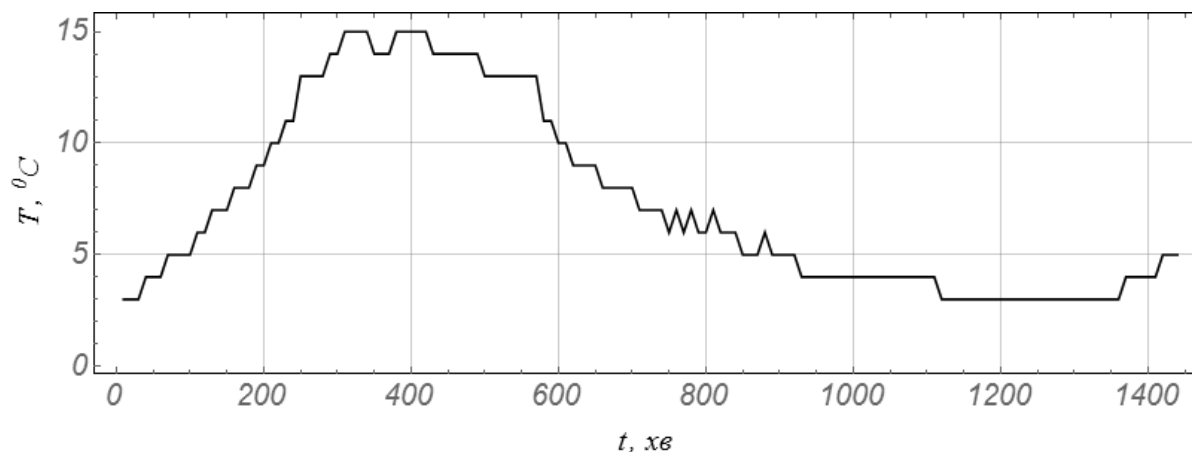


Рис. Д.1.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

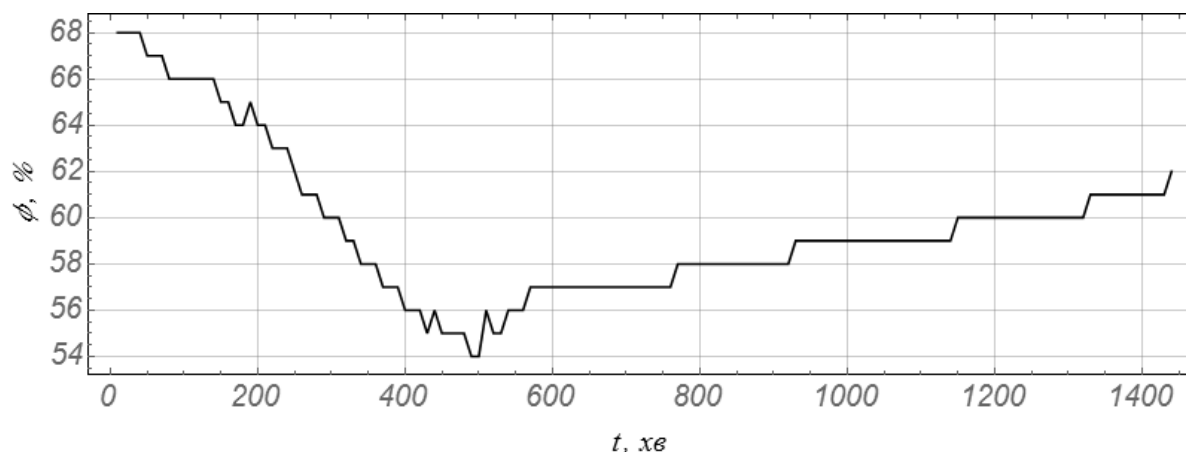


Рис. Д.1.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

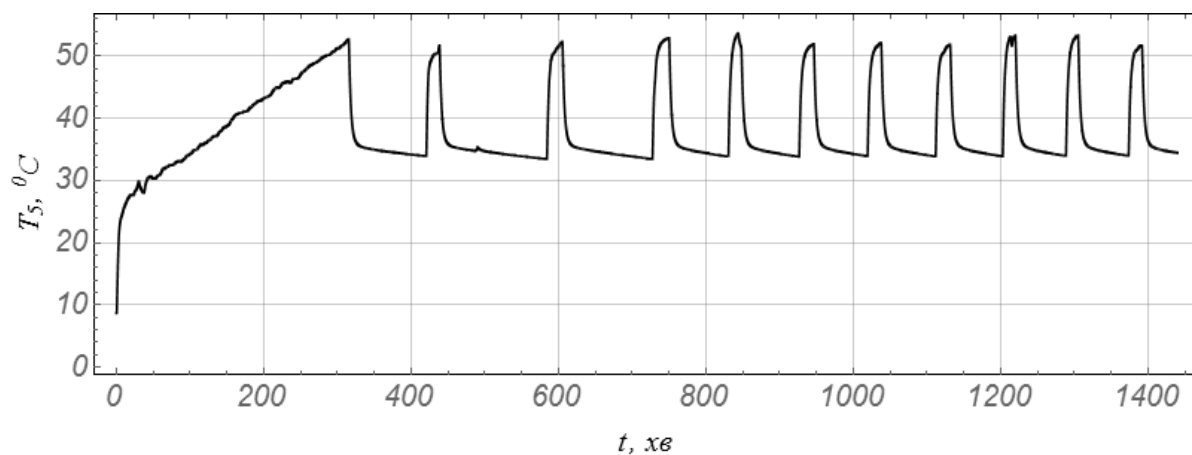


Рис. Д.1.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного на зовнішній стінці біогазового реактора

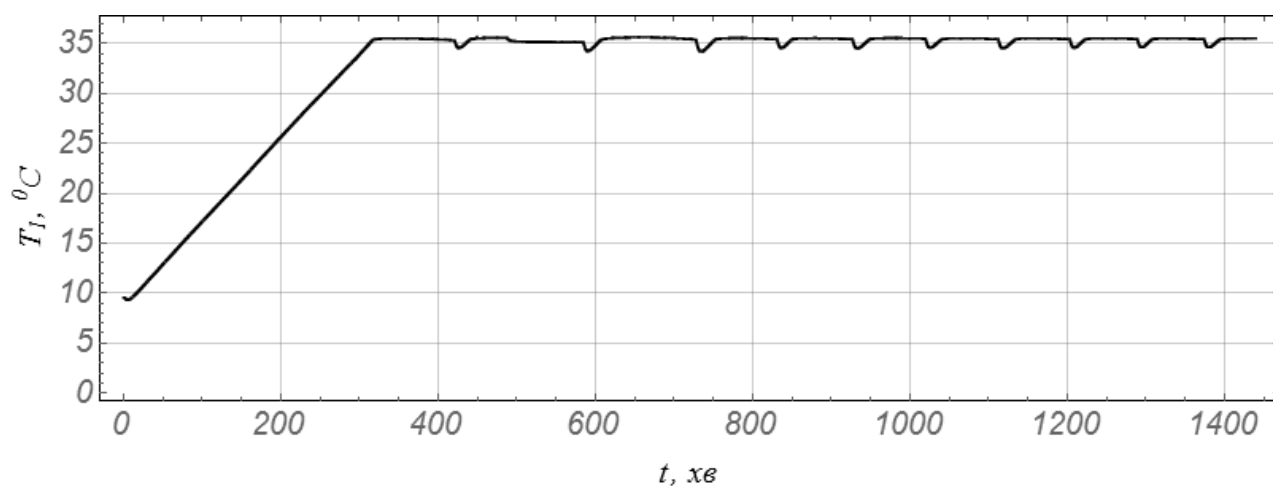


Рис. Д.1.4. Графік зміни температури першої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

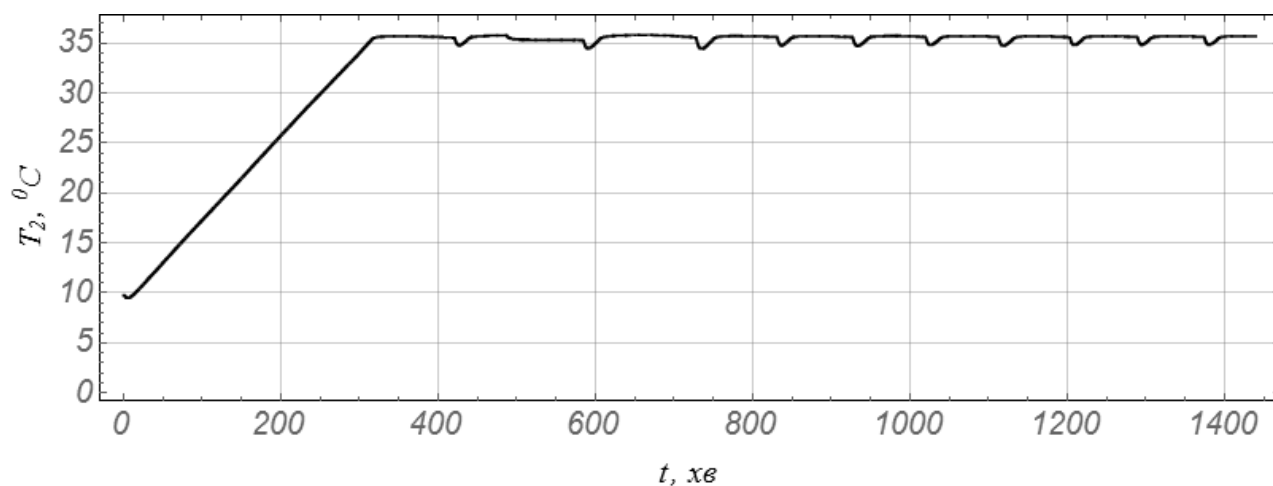


Рис. Д.1.5. Графік зміни температури другої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

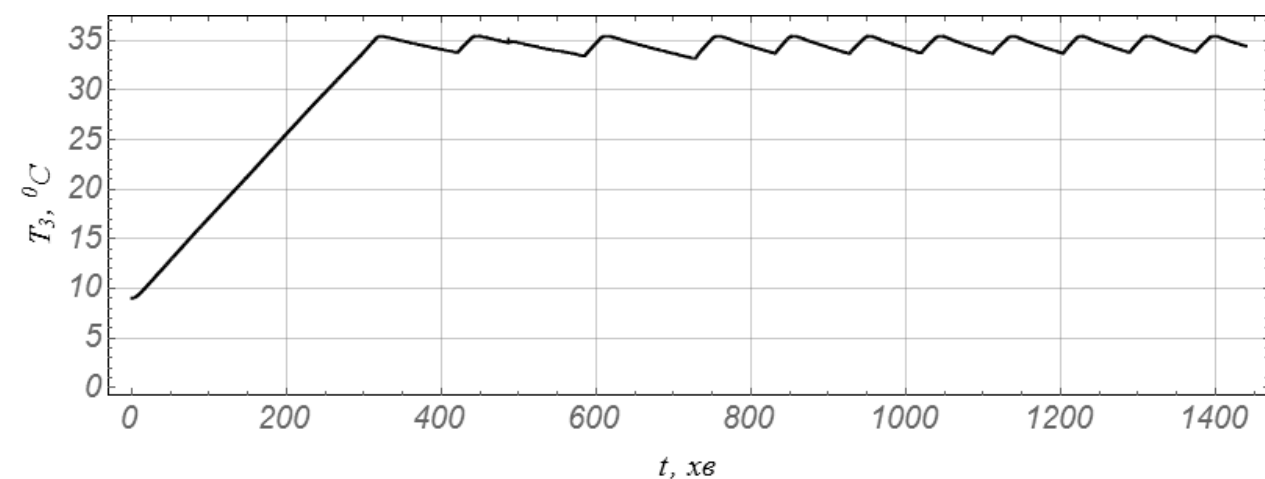


Рис. Д.1.6. Графік зміни температури першої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

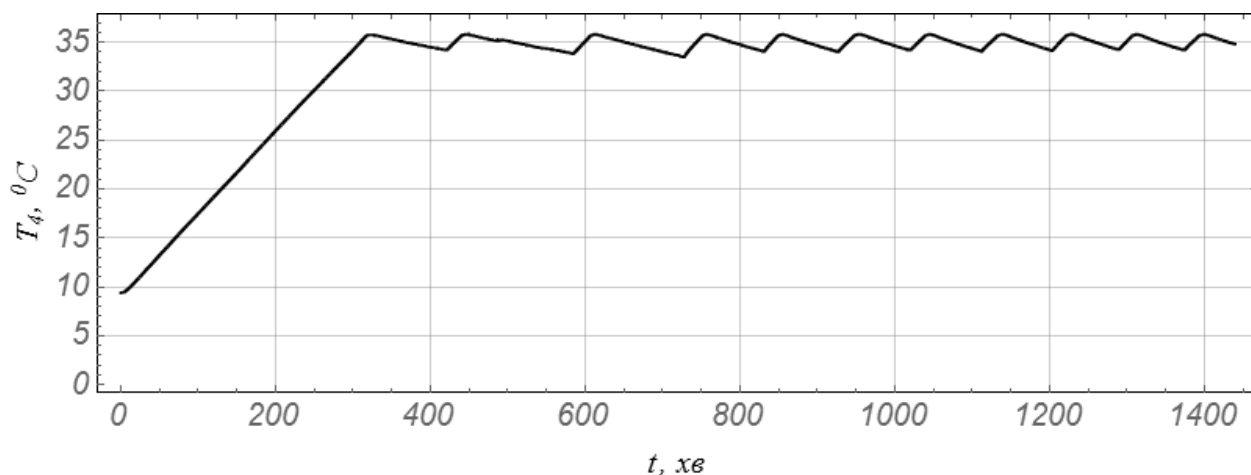


Рис. Д.1.7. Графік зміни температури другої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

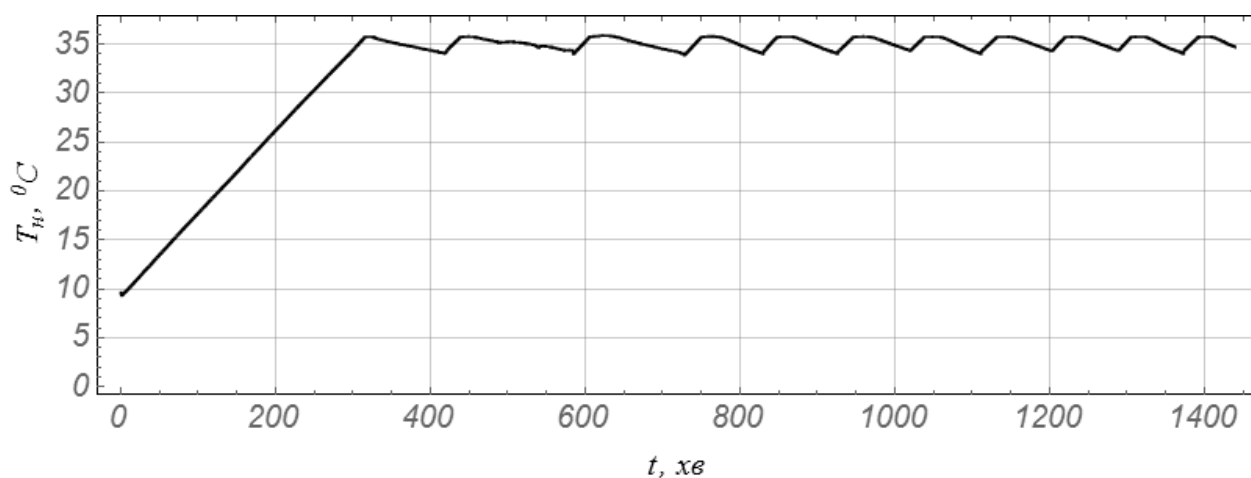


Рис. Д.1.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

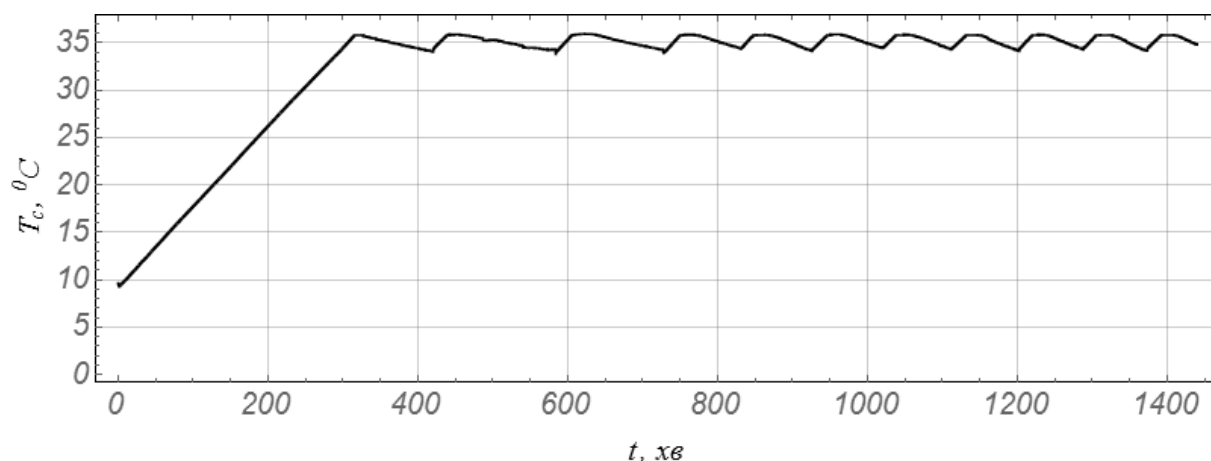


Рис. Д.1.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

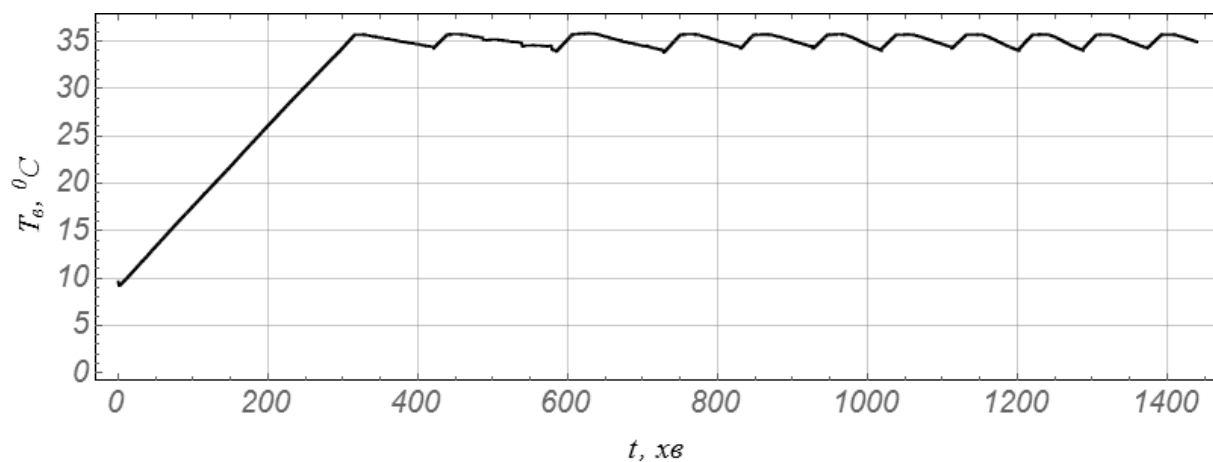


Рис. Д.1.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

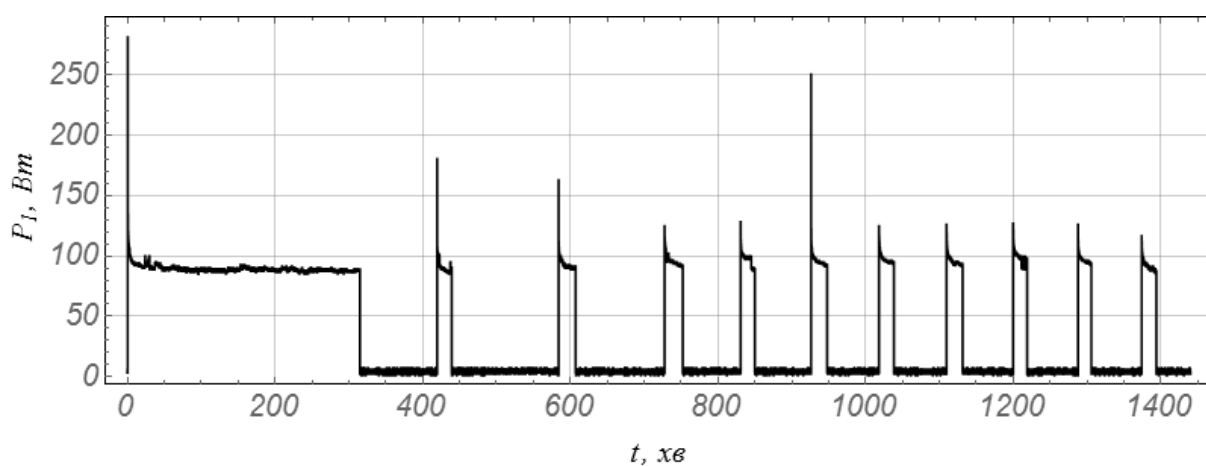


Рис. Д.1.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

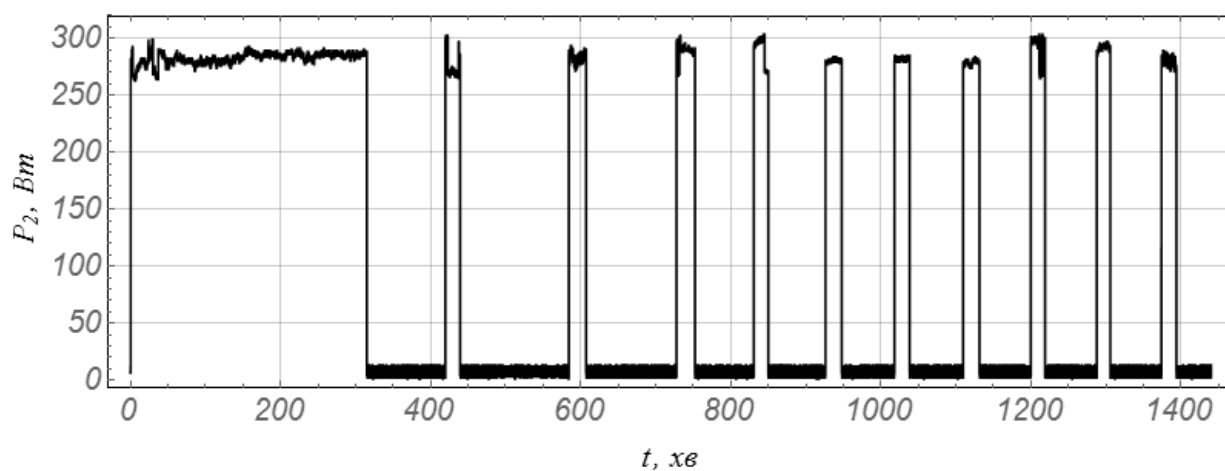


Рис. Д.1.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора

Д.2. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки (1 доба)

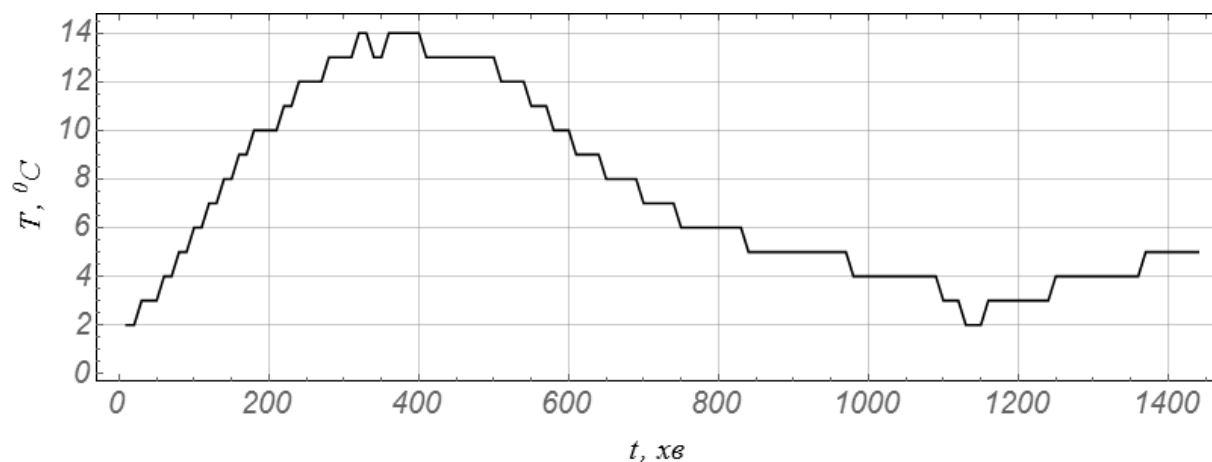


Рис. Д.2.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

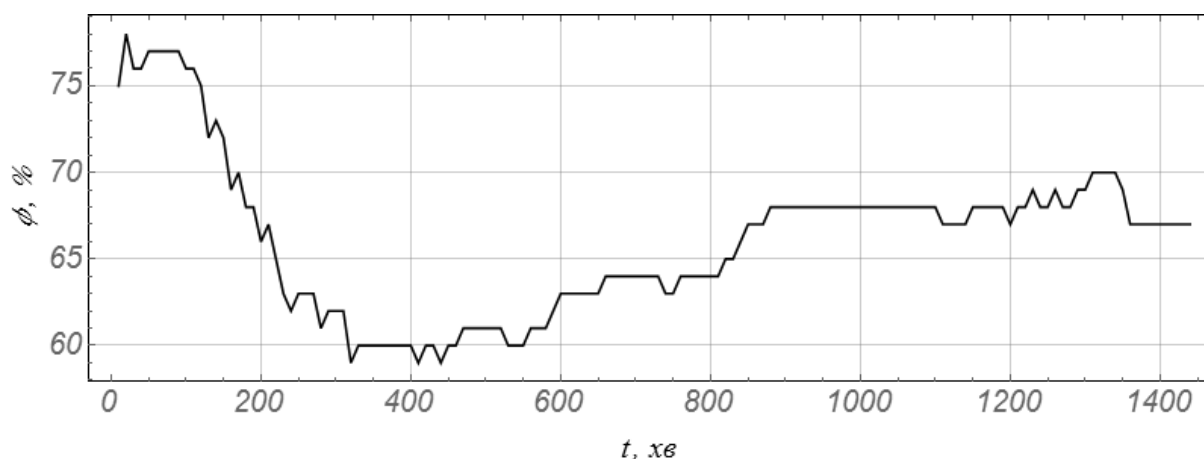


Рис. Д.2.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

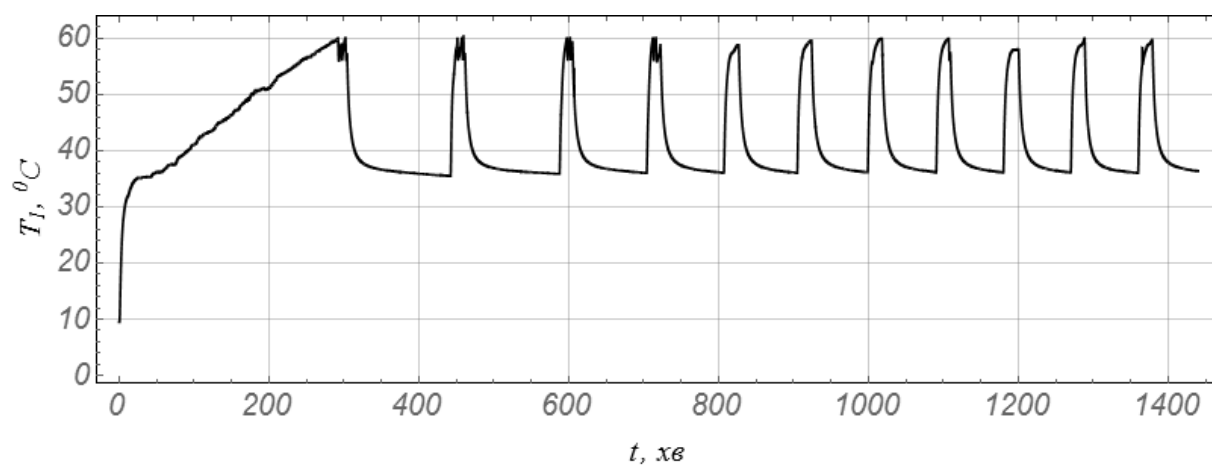


Рис. Д.2.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій нижній лопаті лопатевої мішалки

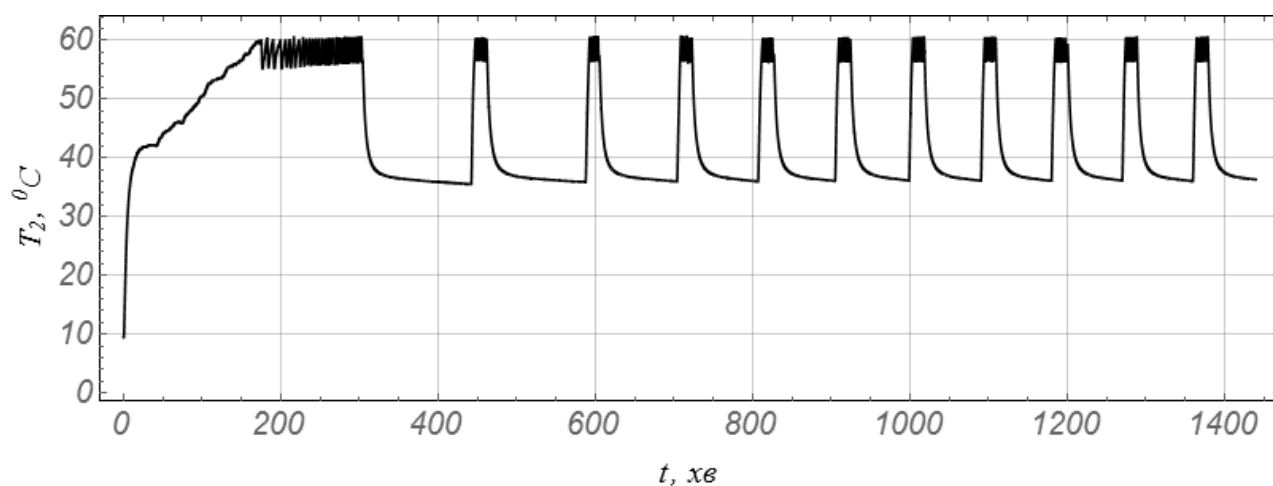


Рис. Д.2.4. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій нижній лопаті лопатевої мішалки

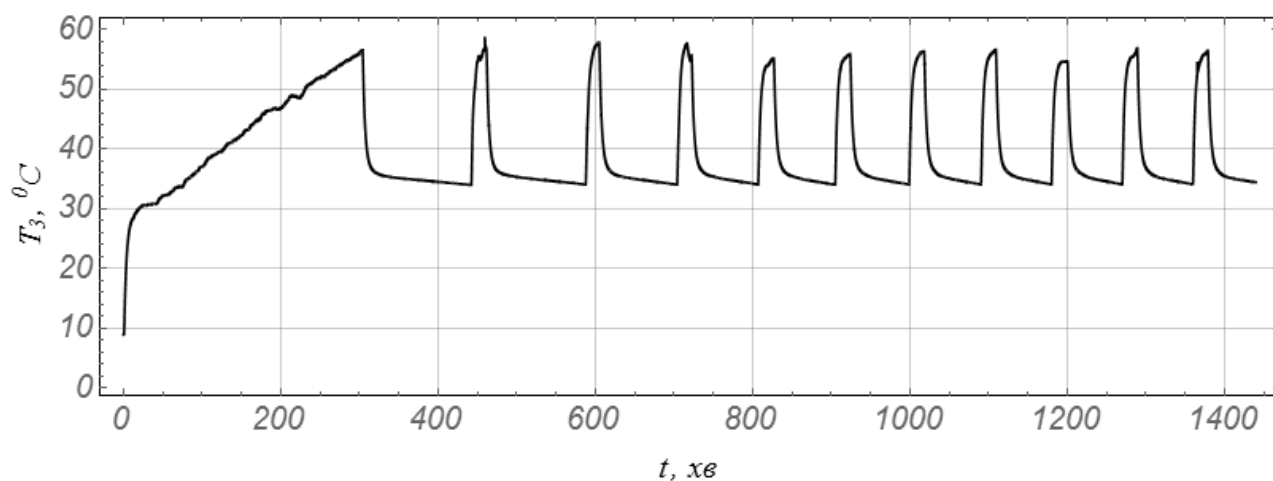


Рис. Д.2.5. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій верхній лопаті лопатевої мішалки

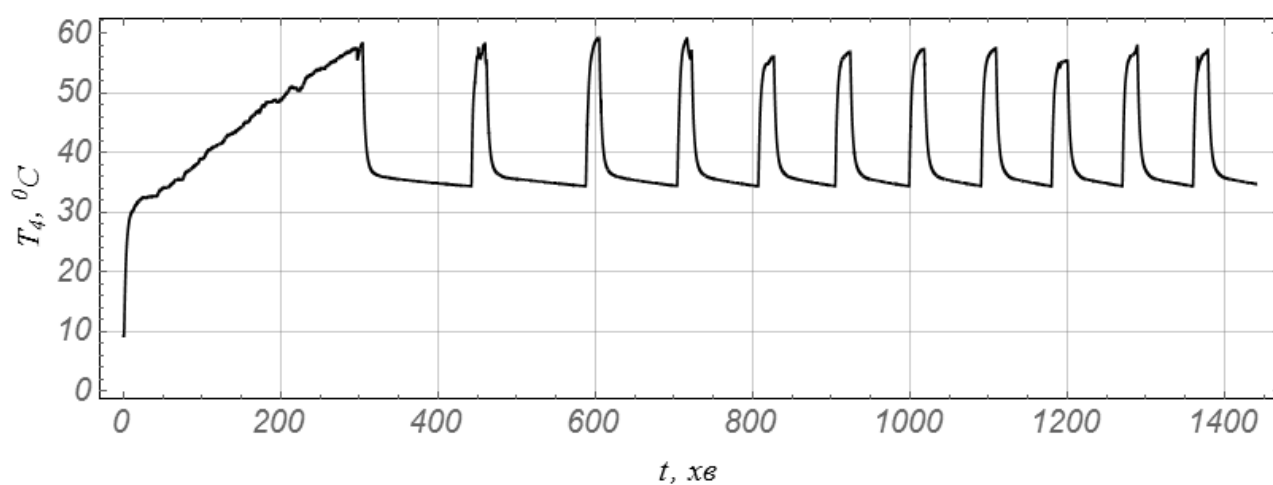


Рис. Д.2.6. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій верхній лопаті лопатевої мішалки

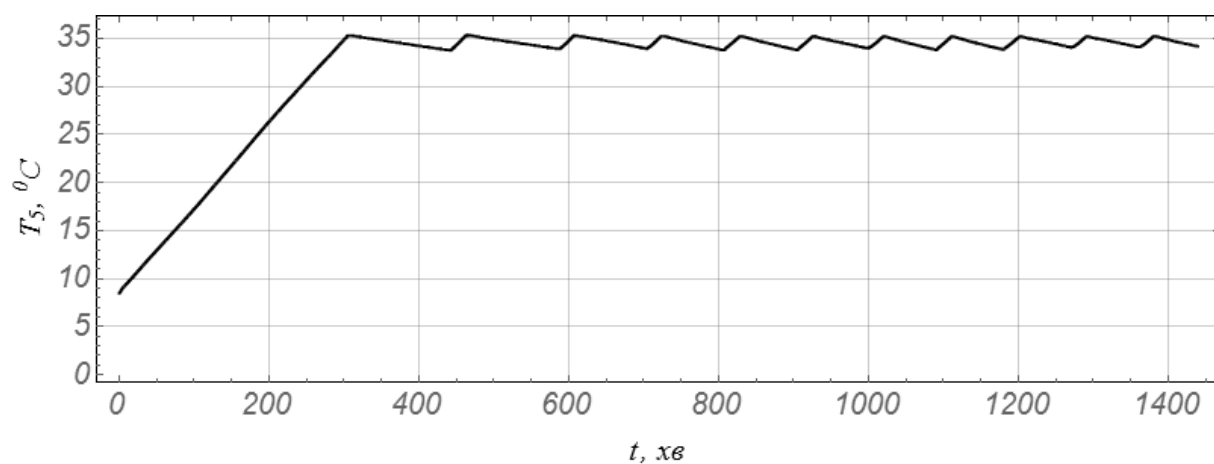


Рис. Д.2.7. Графік зміни температури стінки біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

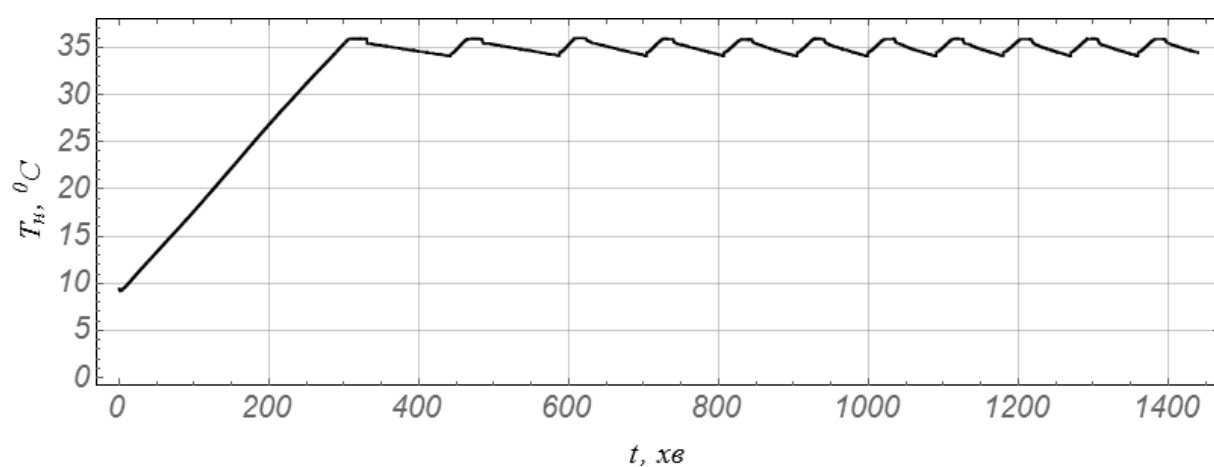


Рис. Д.2.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

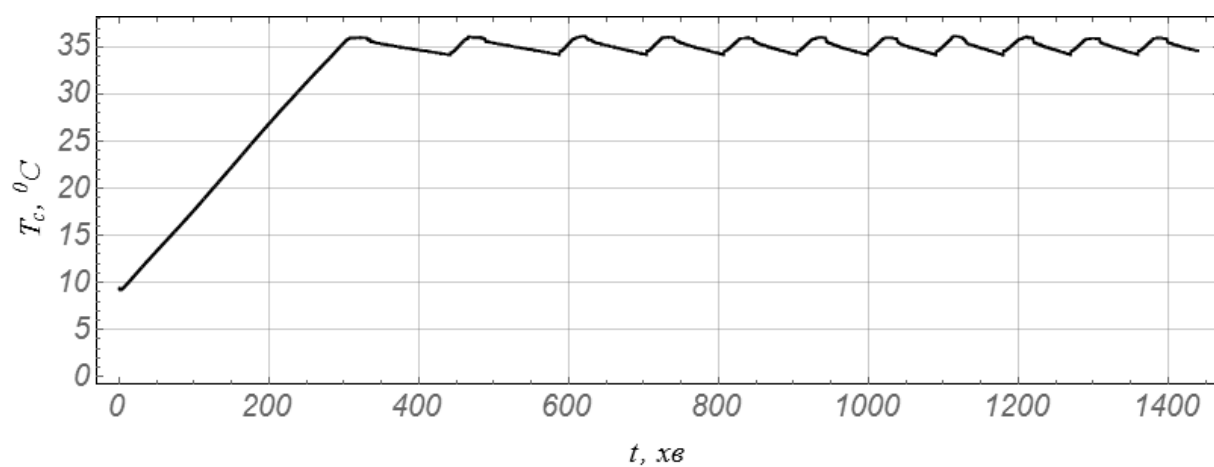


Рис. Д.2.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

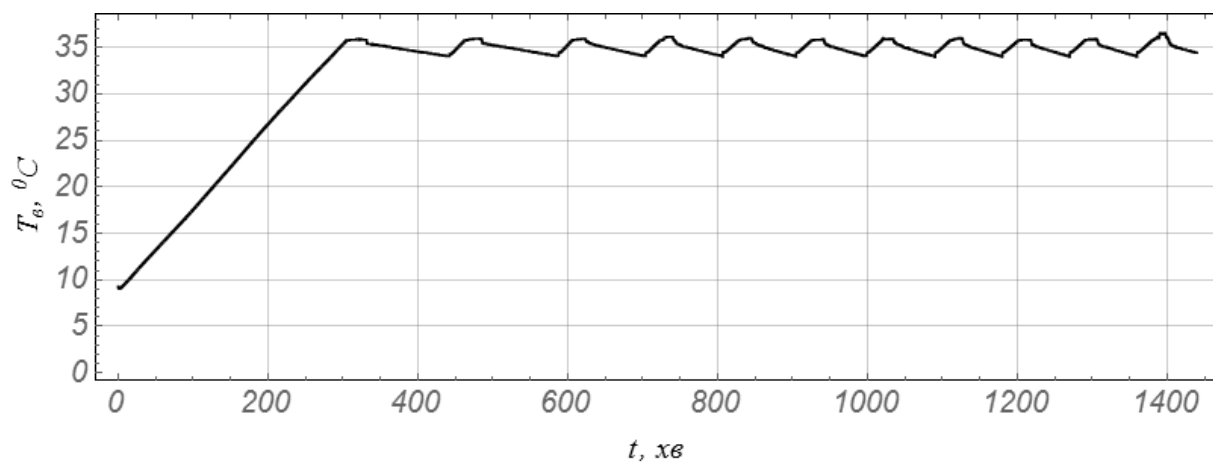


Рис. Д.2.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

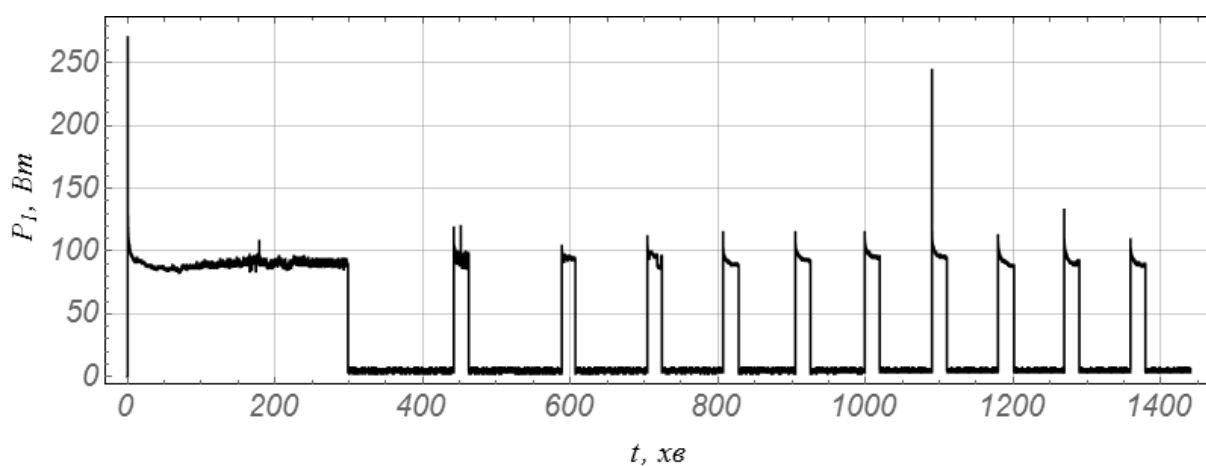


Рис. Д.2.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

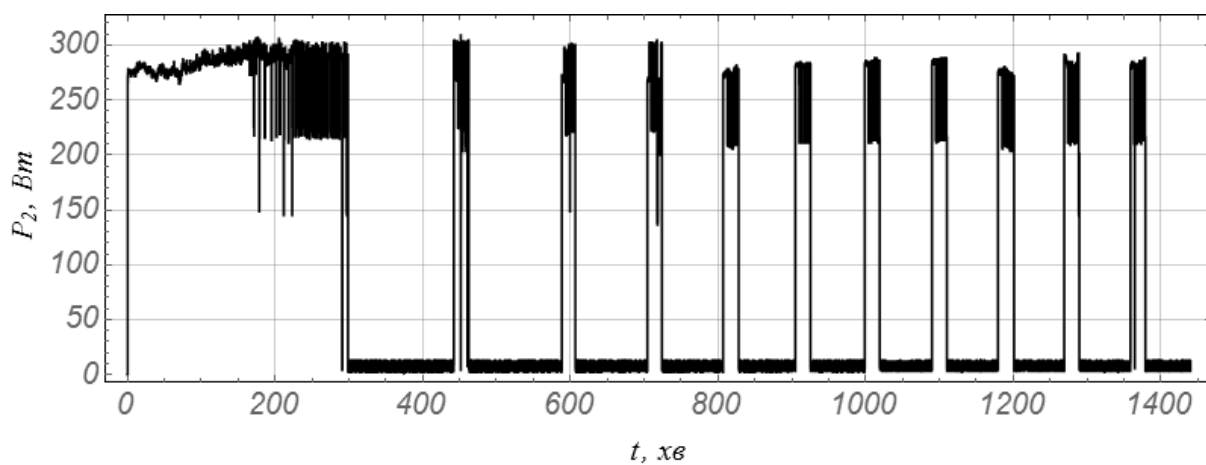


Рис. Д.2.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним у лопатях лопатевої мішалки

Д.3. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактору (2 доба)

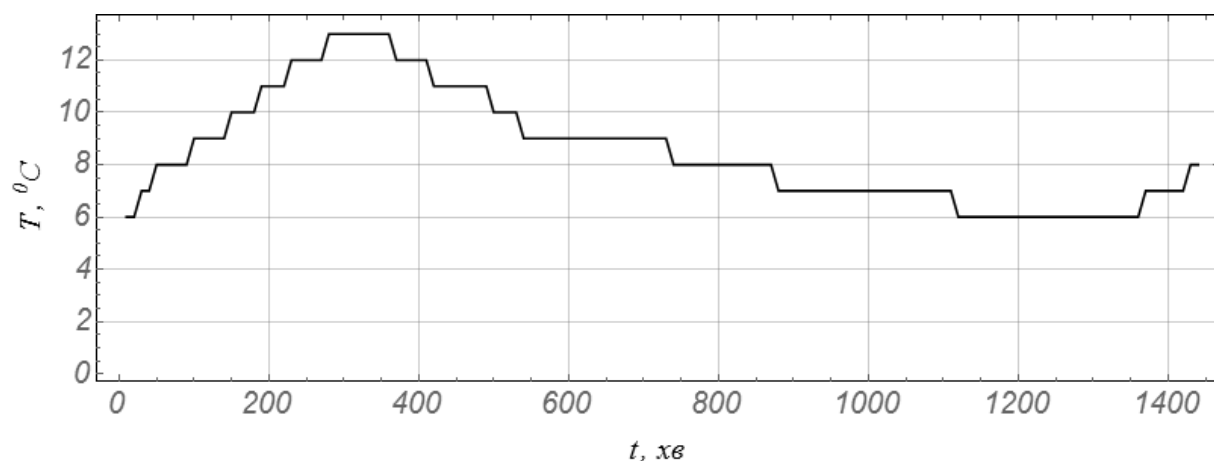


Рис. Д.3.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

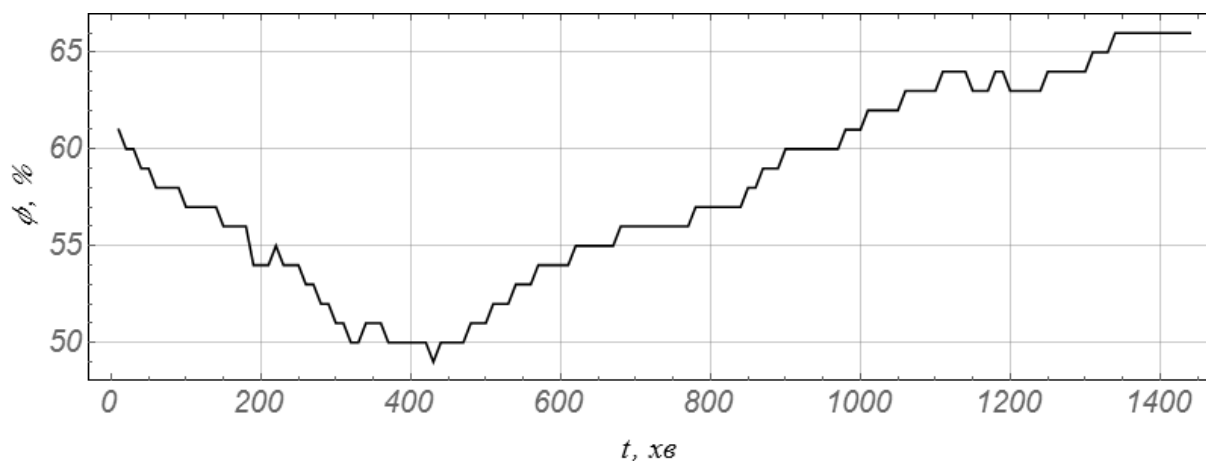


Рис. Д.3.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

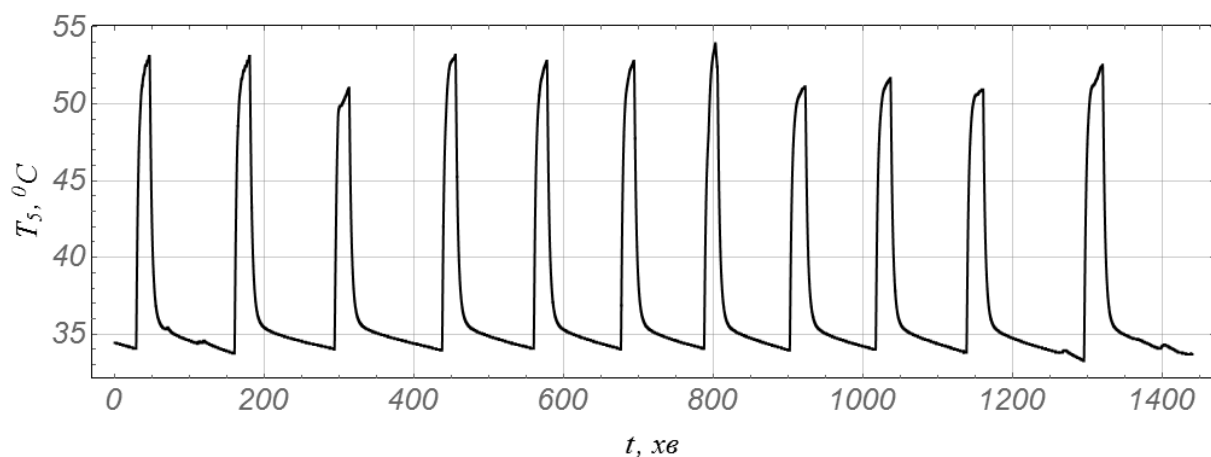


Рис. Д.3.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного на зовнішній стінці біогазового реактора

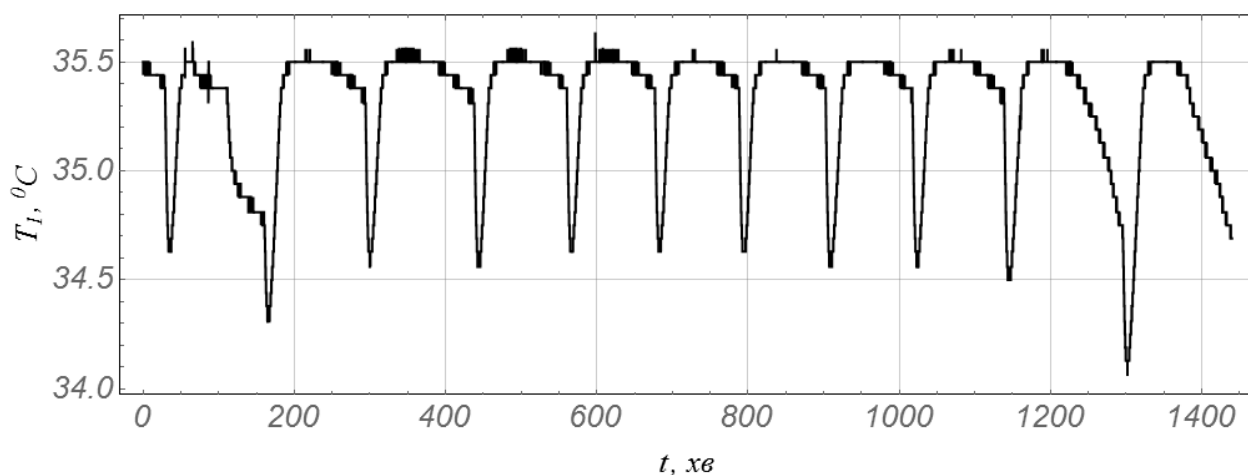


Рис. Д.3.4. Графік зміни температури першої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

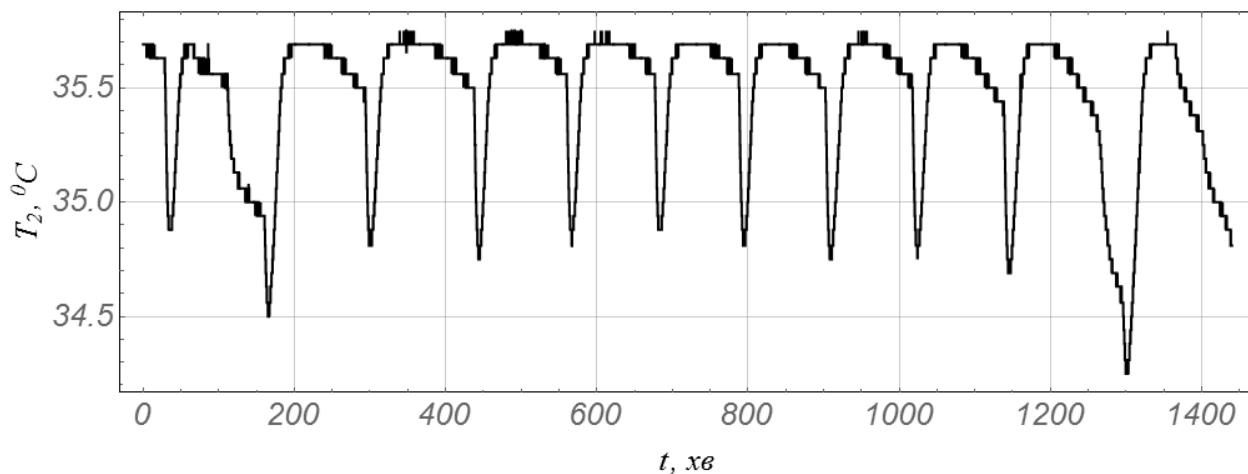


Рис. Д.3.5. Графік зміни температури другої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

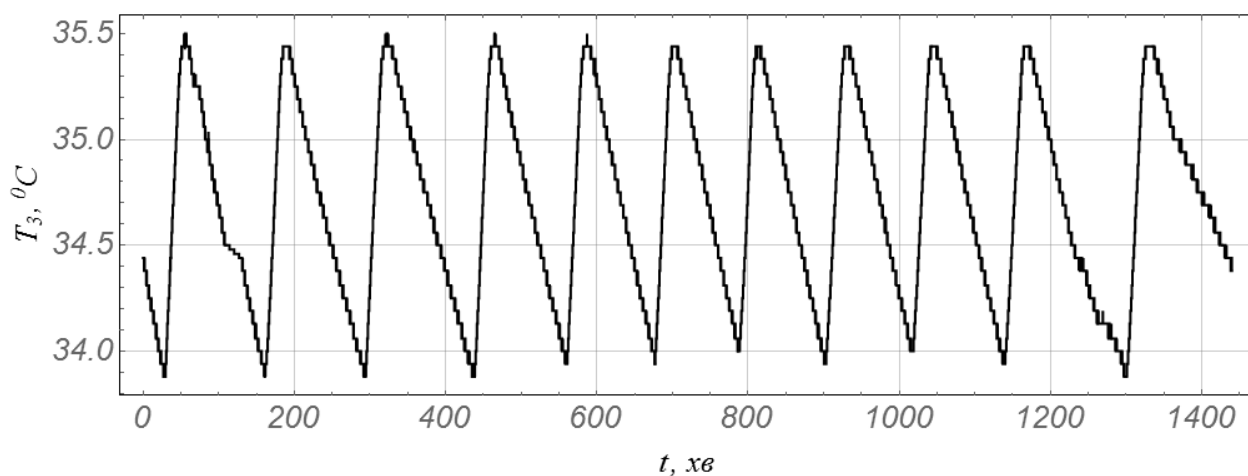


Рис. Д.3.6. Графік зміни температури першої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

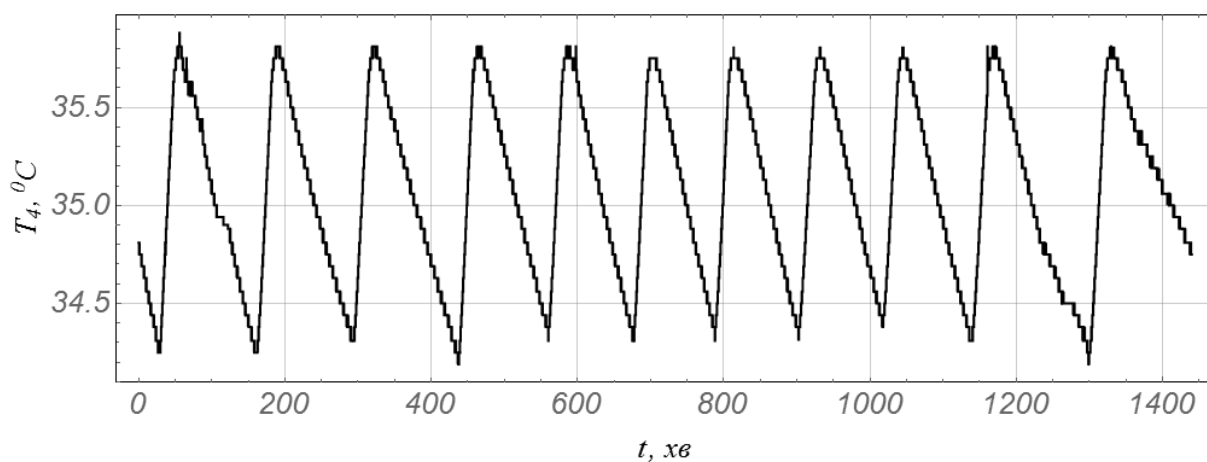


Рис. Д.3.7. Графік зміни температури другої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

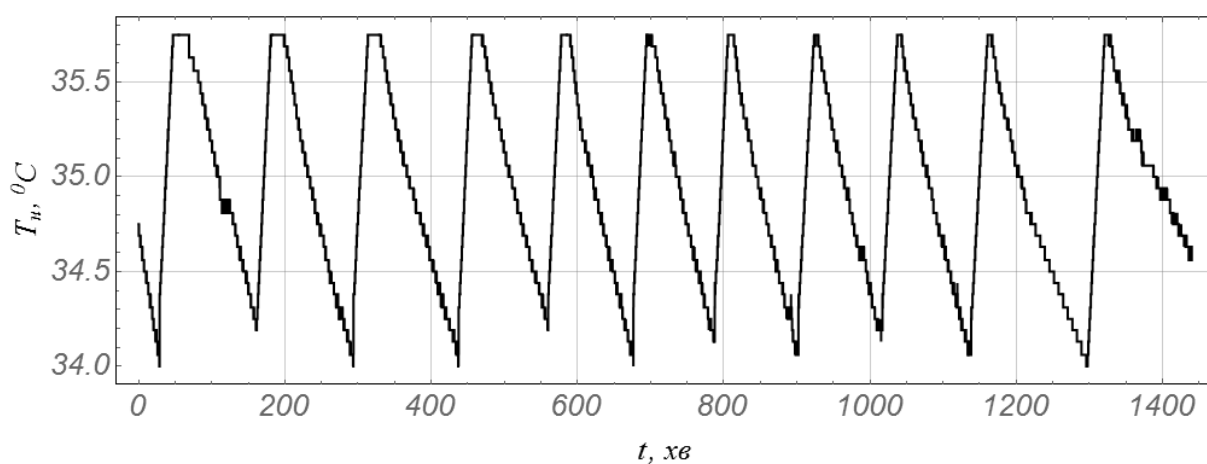


Рис. Д.3.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

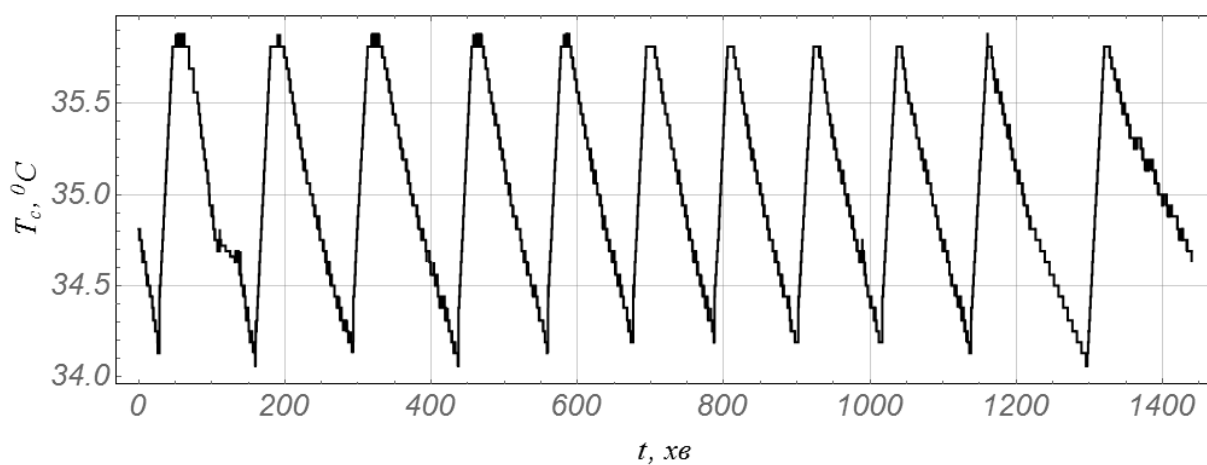


Рис. Д.3.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

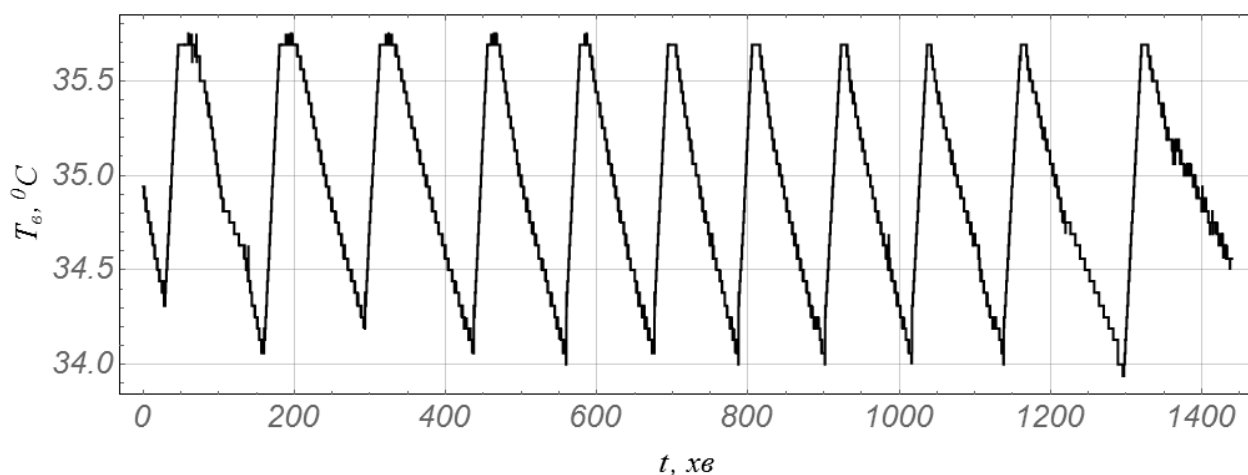


Рис. Д.3.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

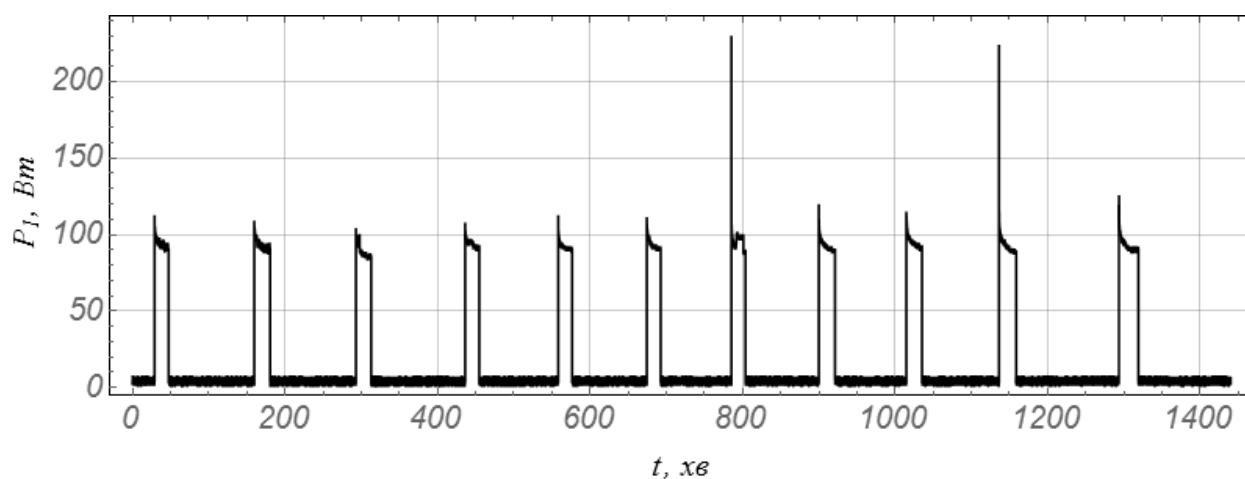


Рис. Д.3.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

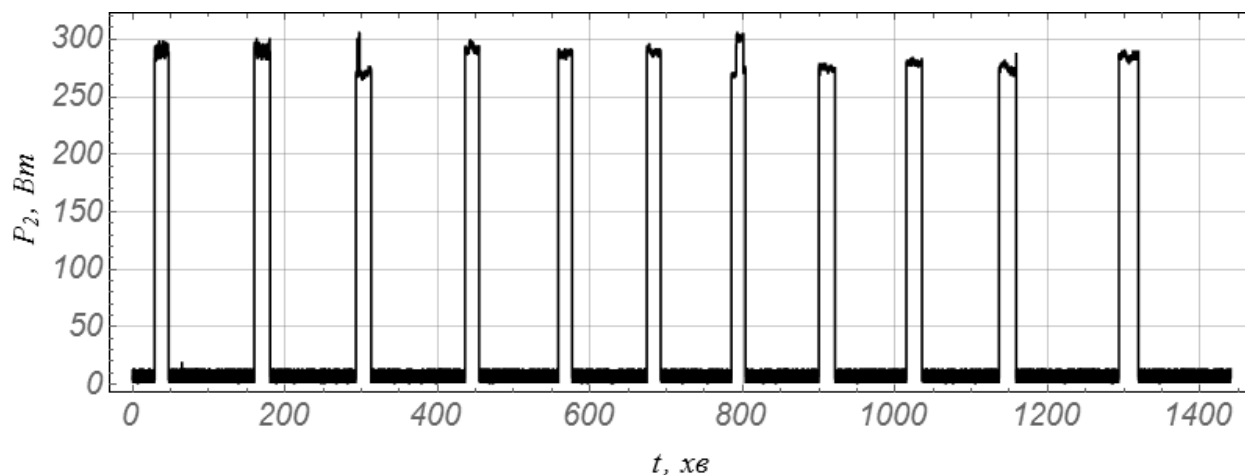


Рис. Д.3.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора

Д.4. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки (2 доба)

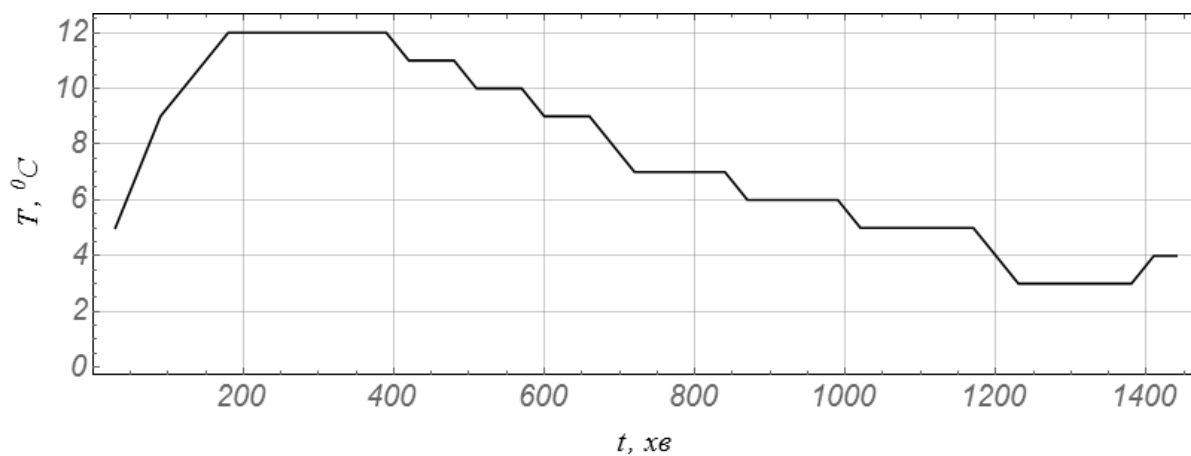


Рис. Д.4.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

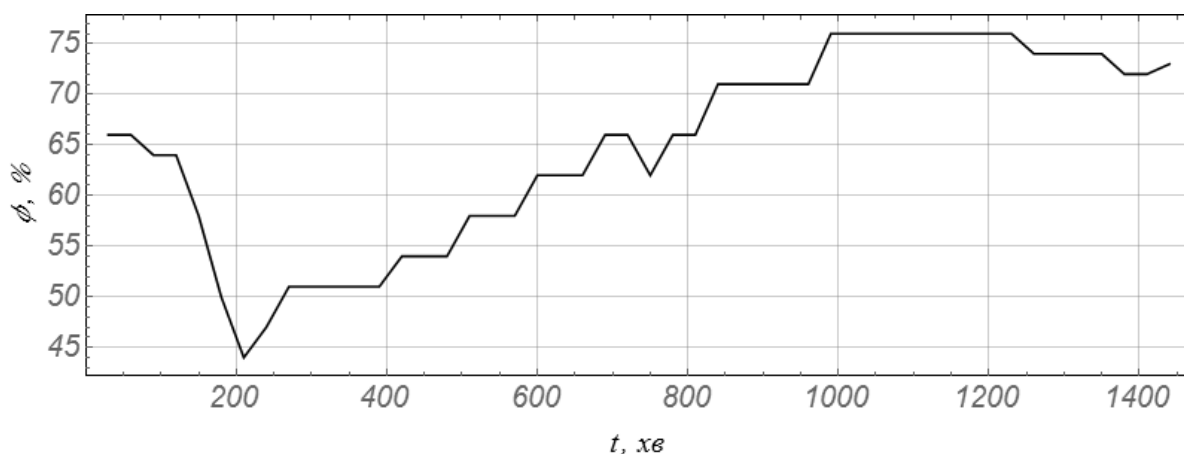


Рис. Д.4.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

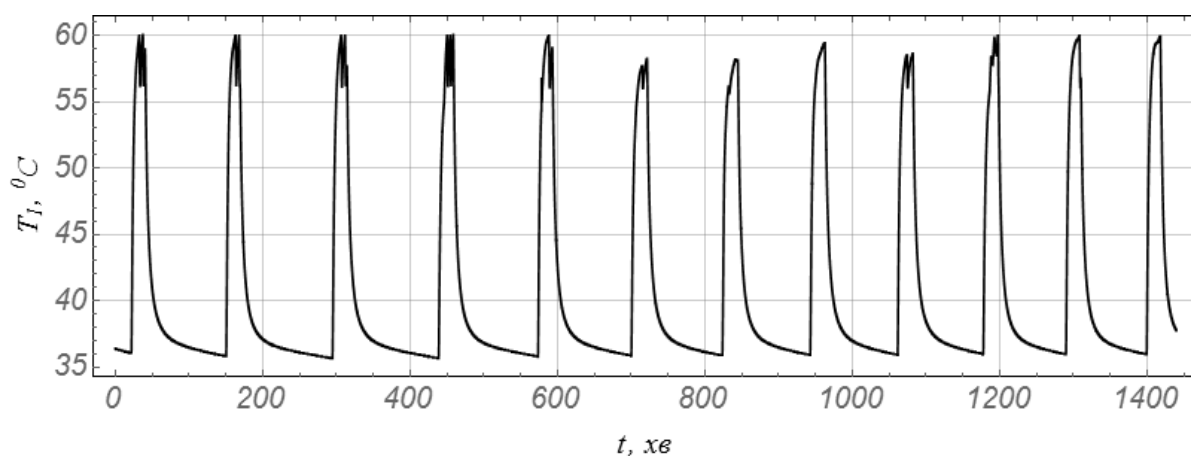


Рис. Д.4.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій нижній лопаті лопатевої мішалки

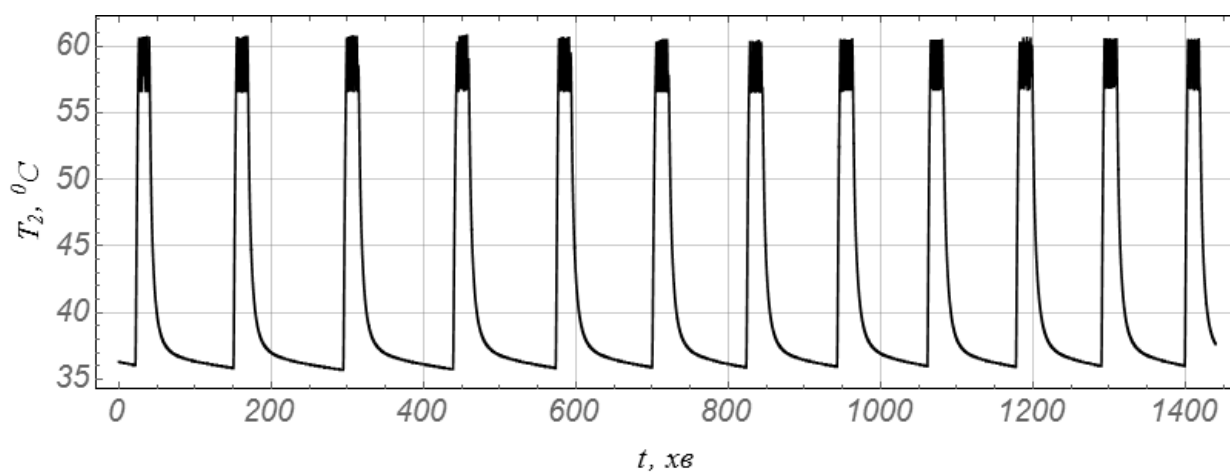


Рис. Д.4.4. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій нижній лопаті лопатевої мішалки

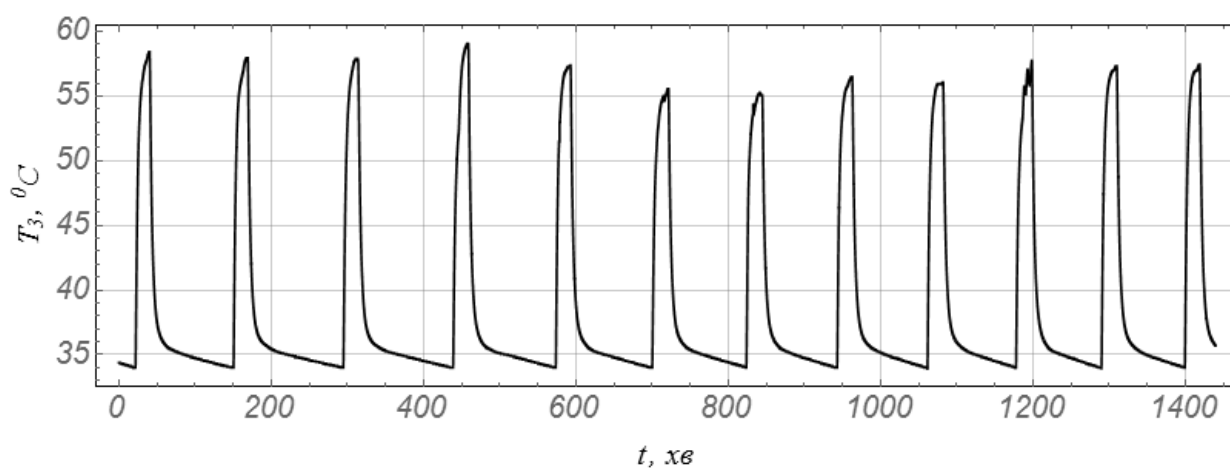


Рис. Д.4.5. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій верхній лопаті лопатевої мішалки

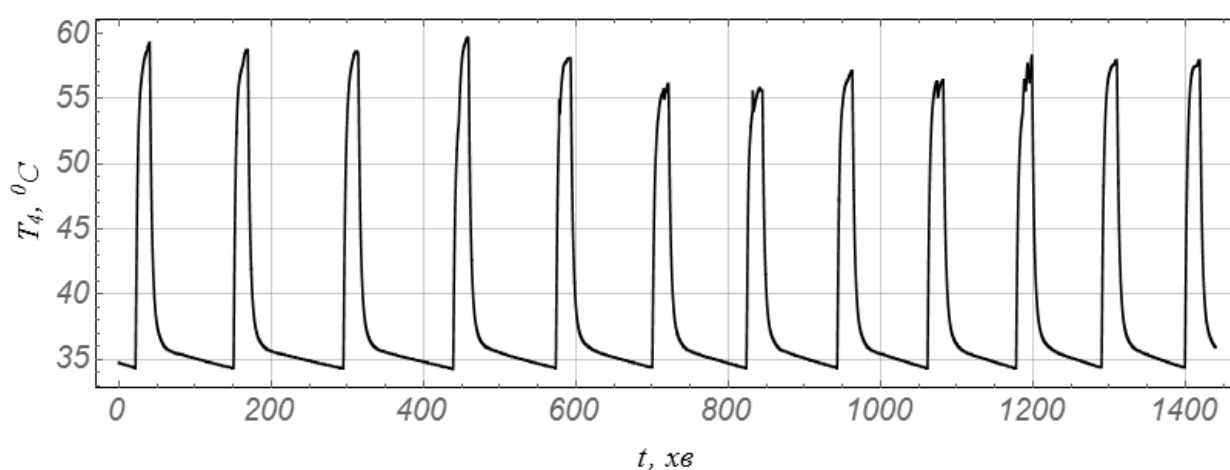


Рис. Д.4.6. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій верхній лопаті лопатевої мішалки

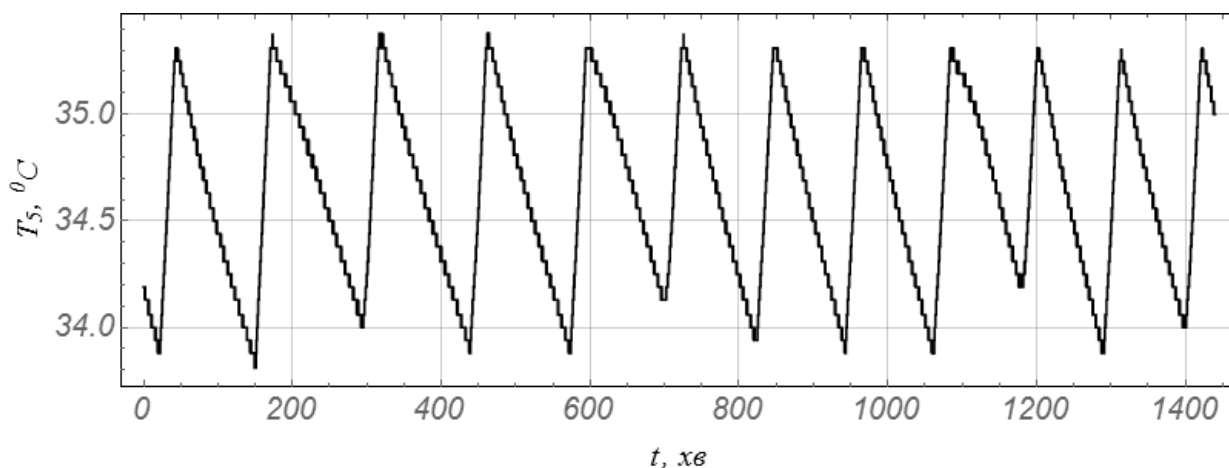


Рис. Д.4.7. Графік зміни температури стінки біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

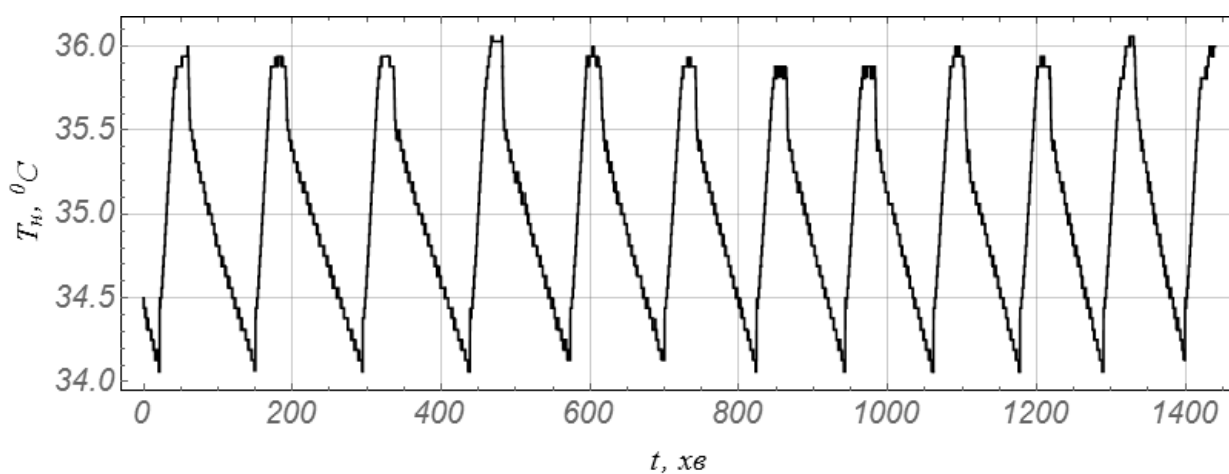


Рис. Д.4.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

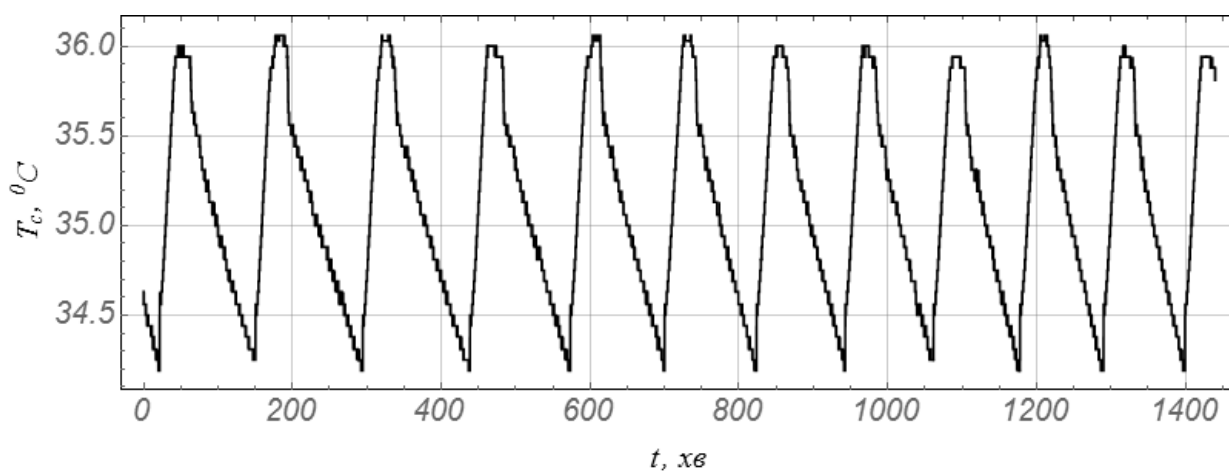


Рис. Д.4.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

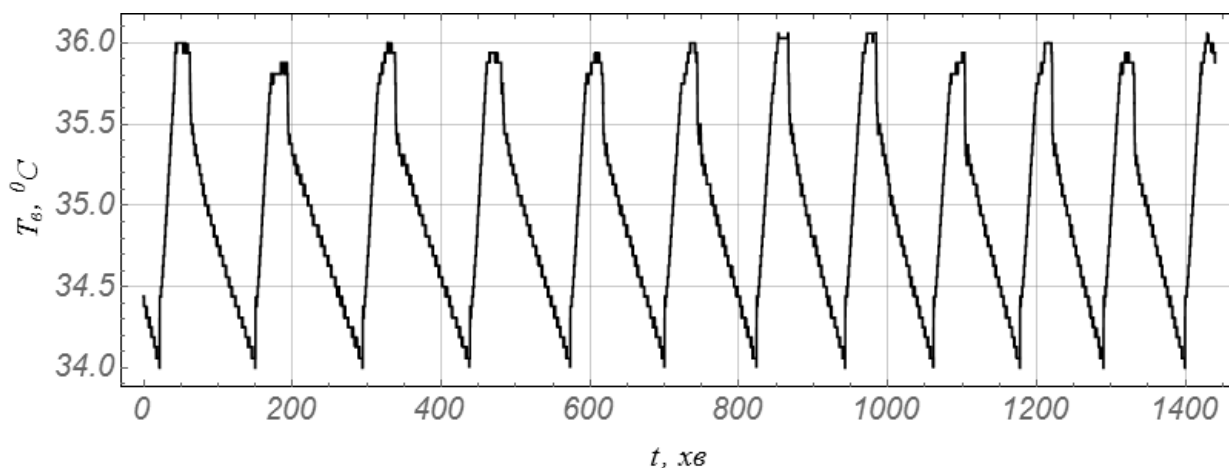


Рис. Д.4.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

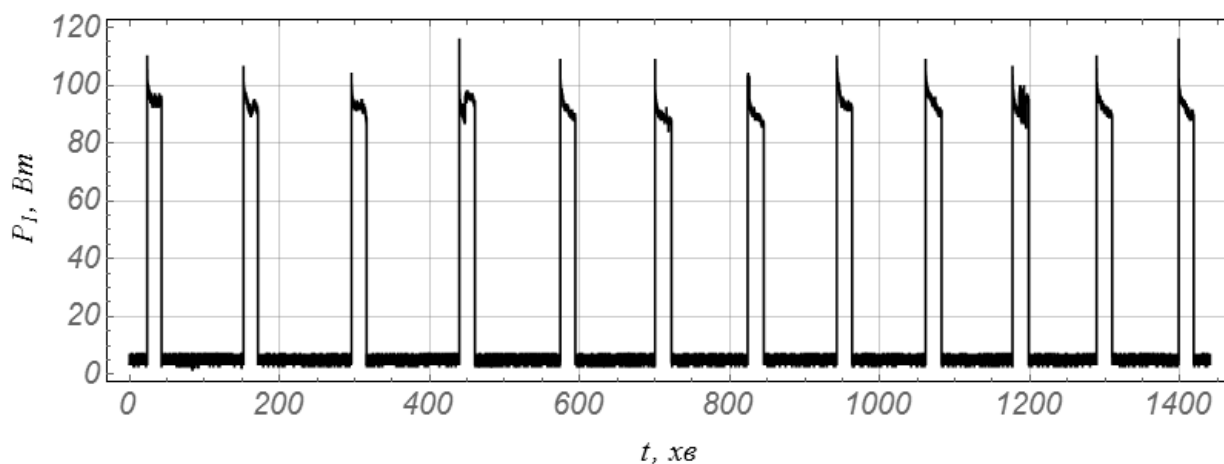


Рис. Д.4.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

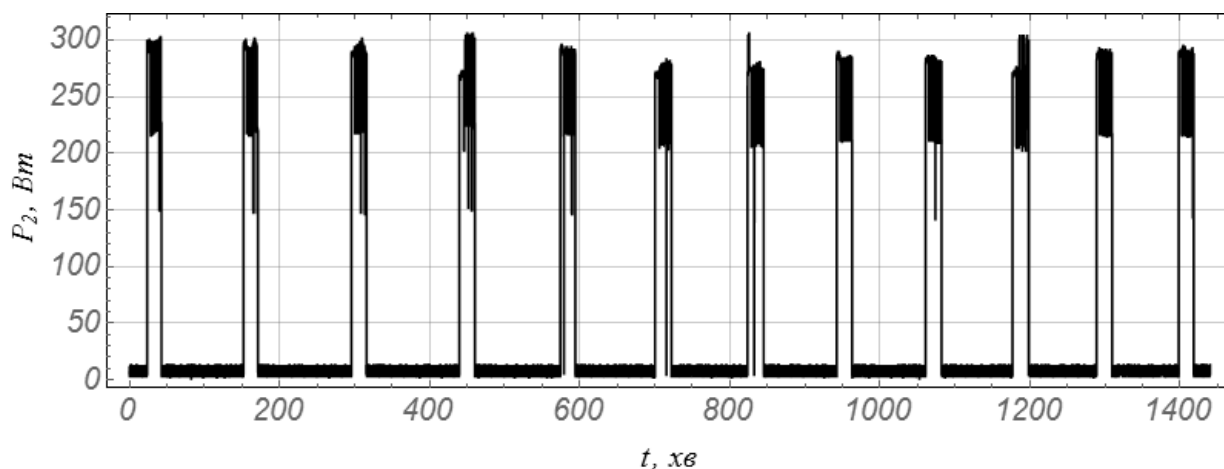


Рис. Д.4.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним у лопатях лопатевої мішалки

Д.5. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактору (3 доба)

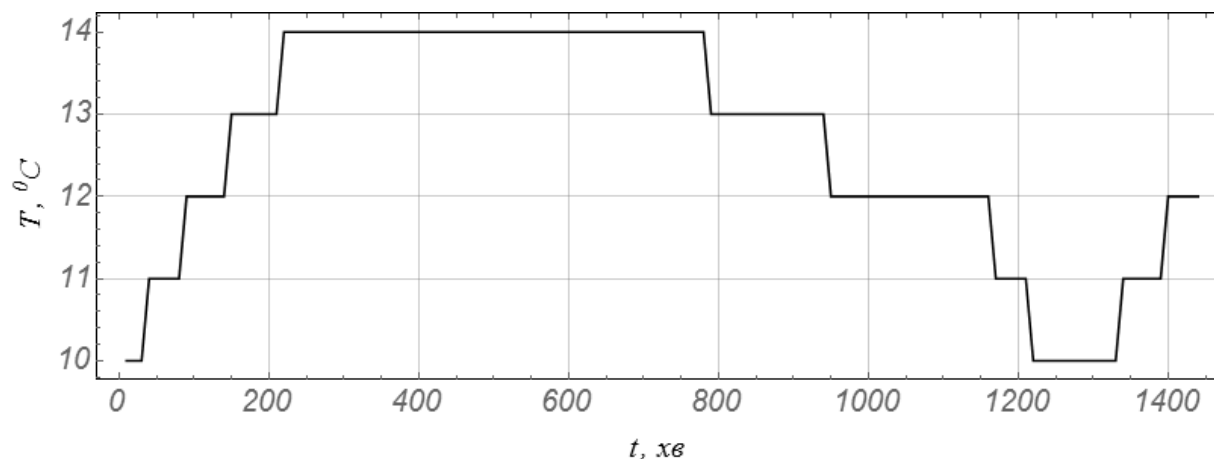


Рис. Д.5.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

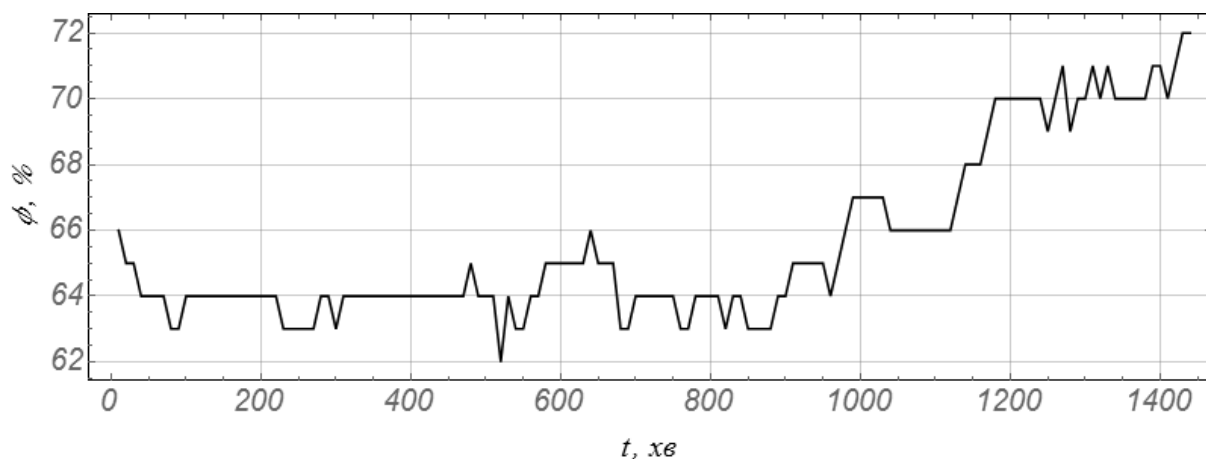


Рис. Д.5.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

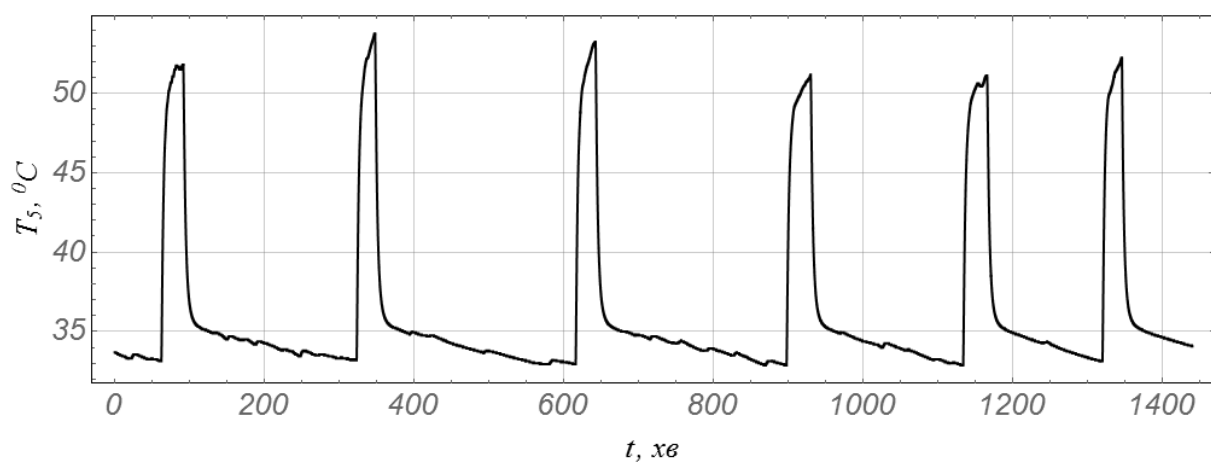


Рис. Д.5.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного на зовнішній стінці біогазового реактора

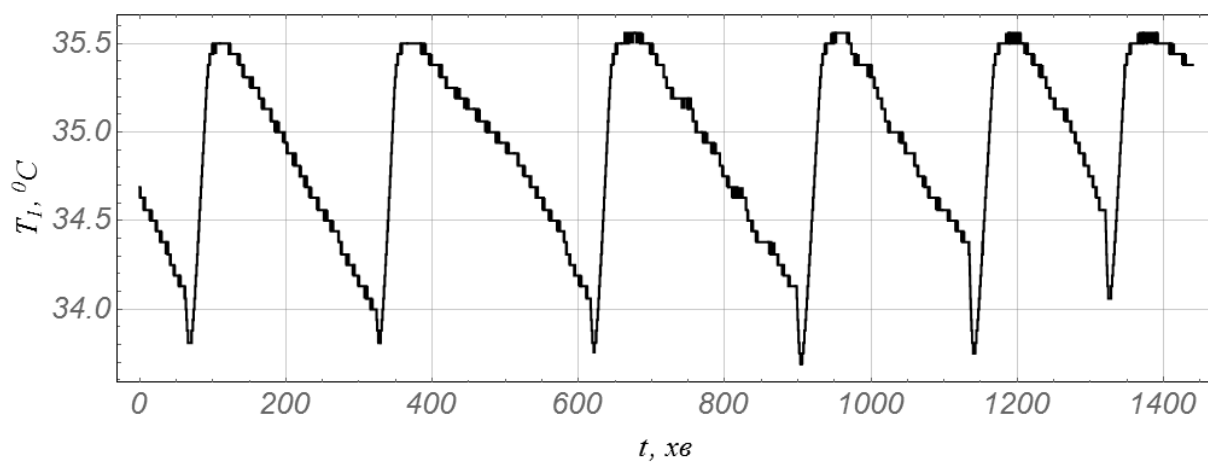


Рис. Д.5.4. Графік зміни температури першої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

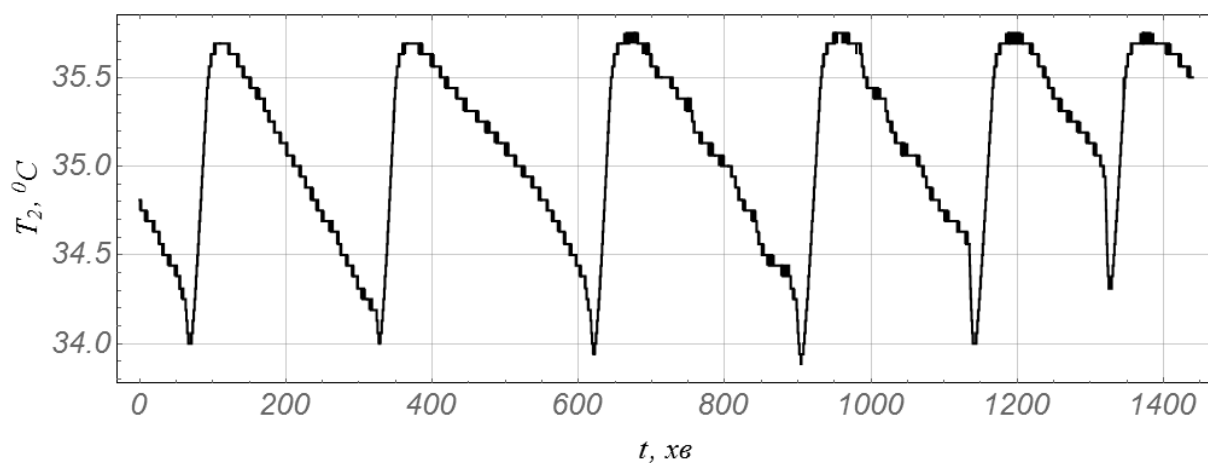


Рис. Д.5.5. Графік зміни температури другої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

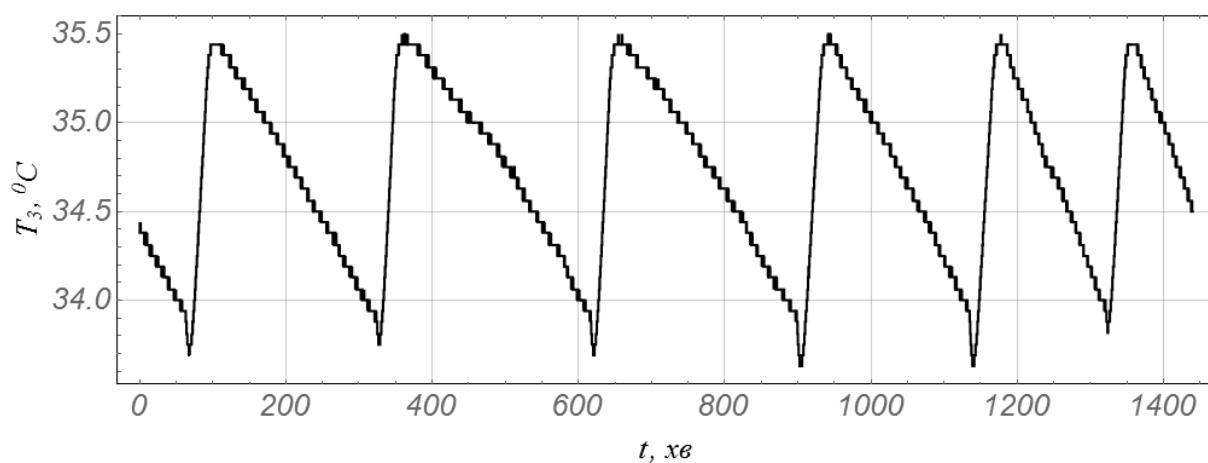


Рис. Д.5.6. Графік зміни температури першої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

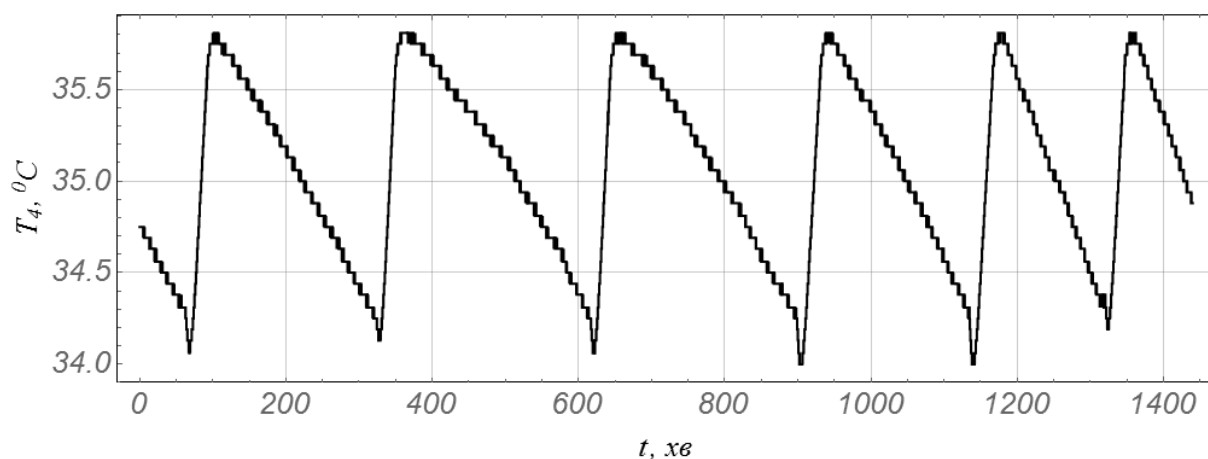


Рис. Д.5.7. Графік зміни температури другої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

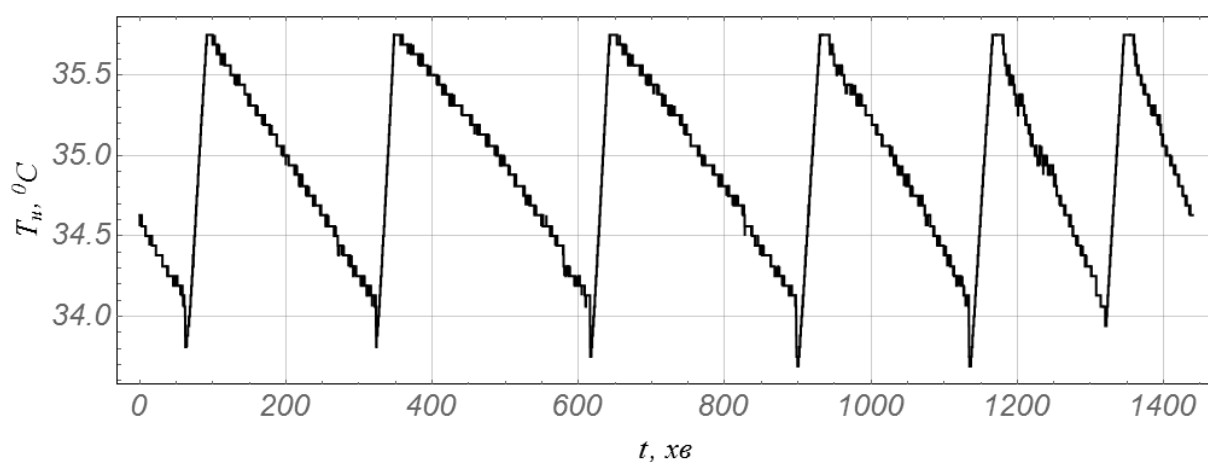


Рис. Д.5.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

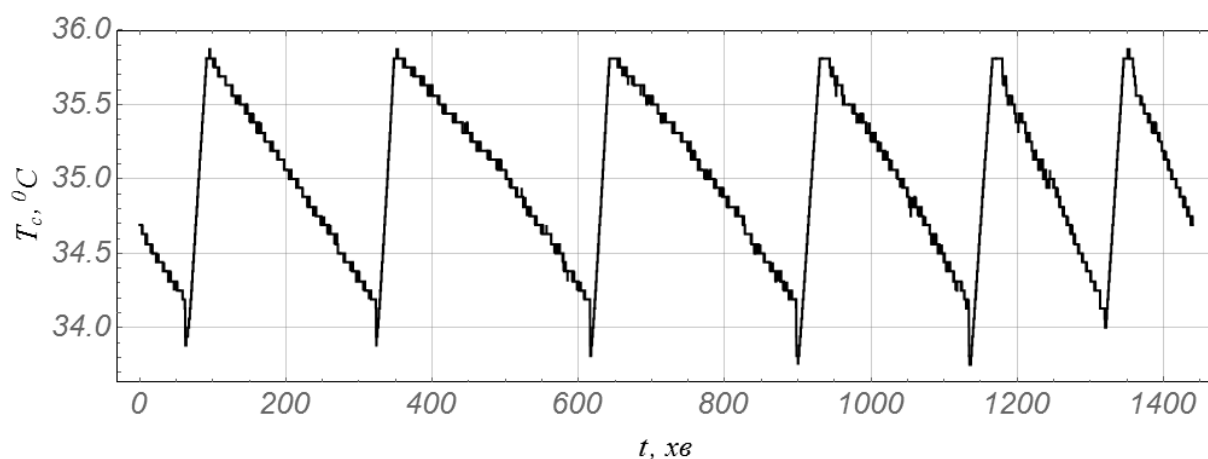


Рис. Д.5.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

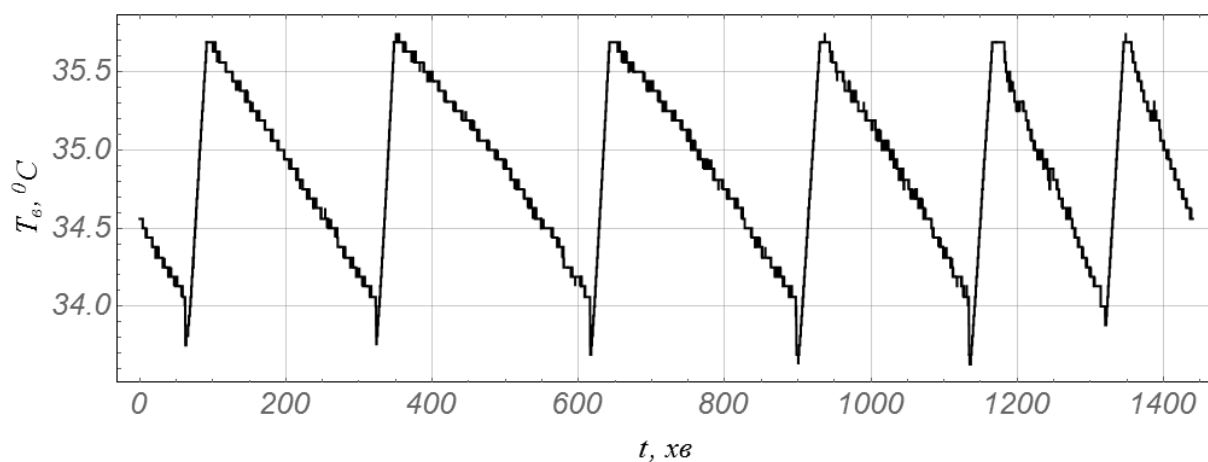


Рис. Д.5.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

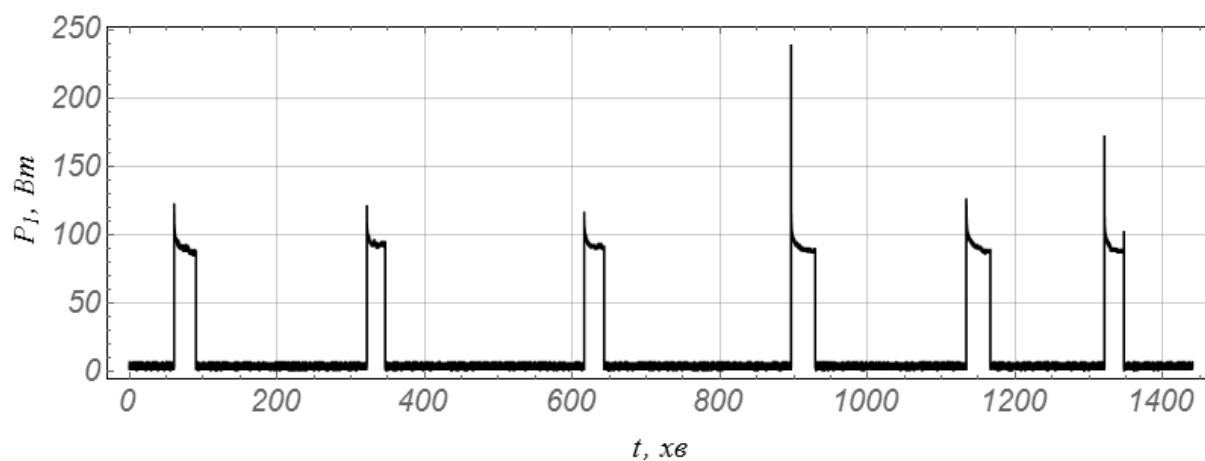


Рис. Д.5.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

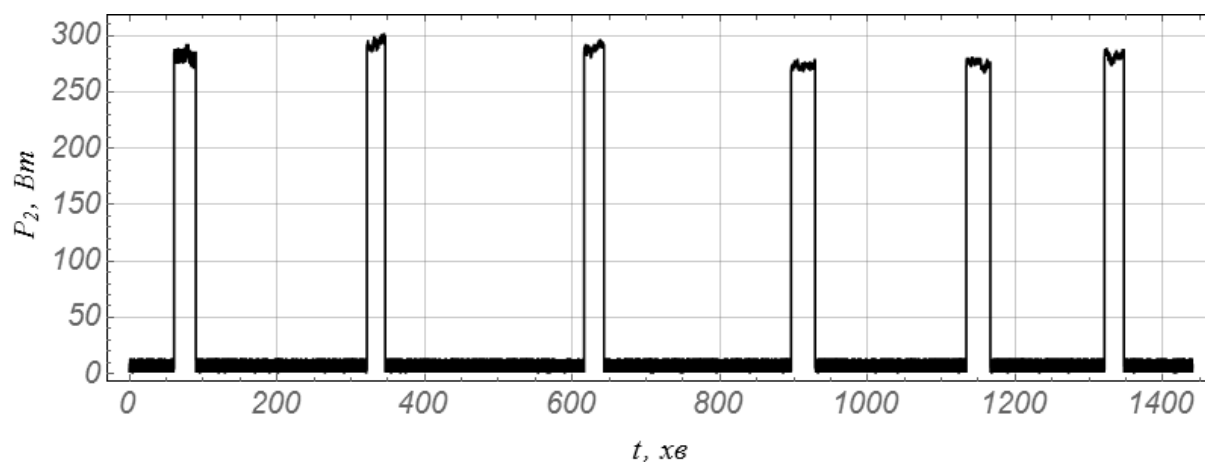


Рис. Д.5.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора

Д.6. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки (3 доба)

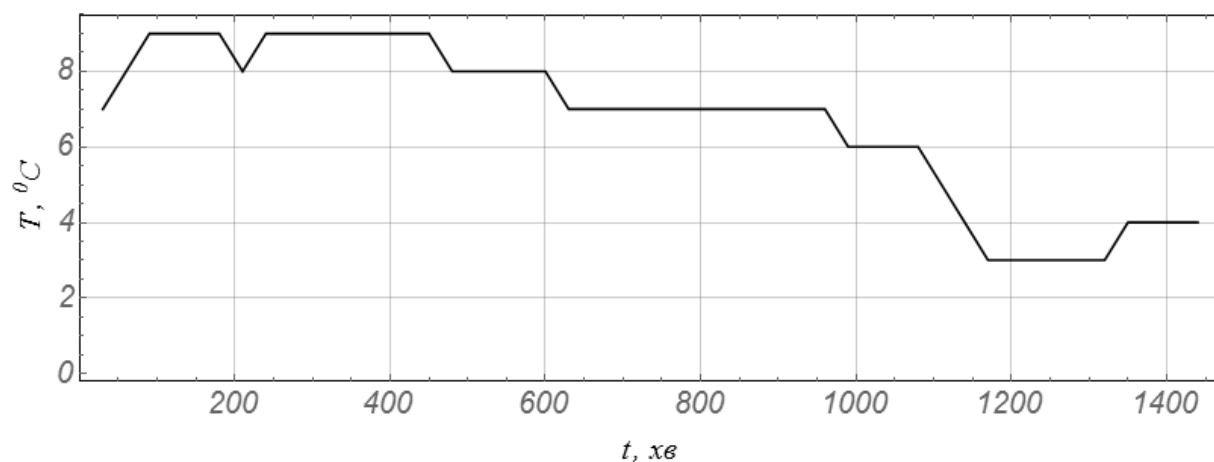


Рис. Д.6.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

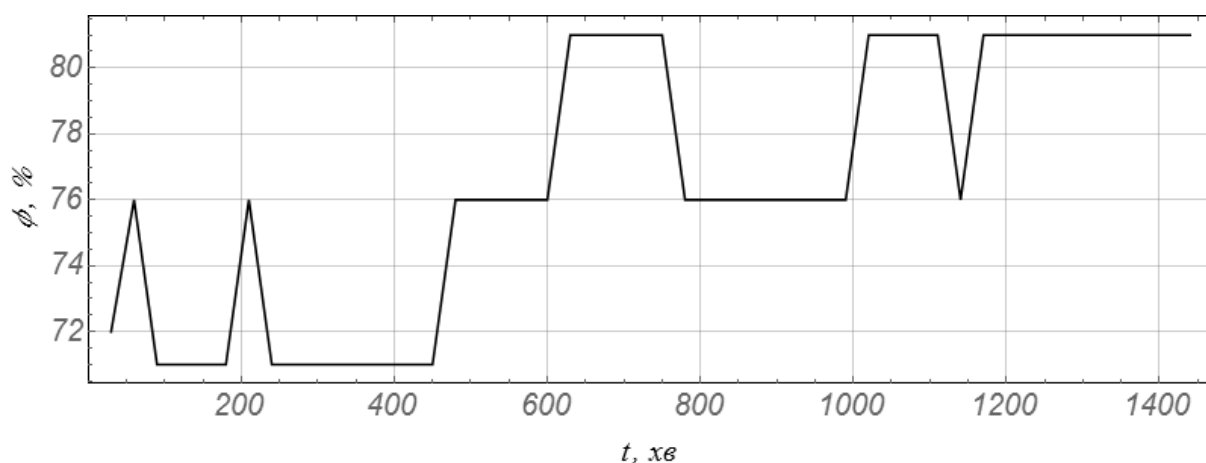


Рис. Д.6.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

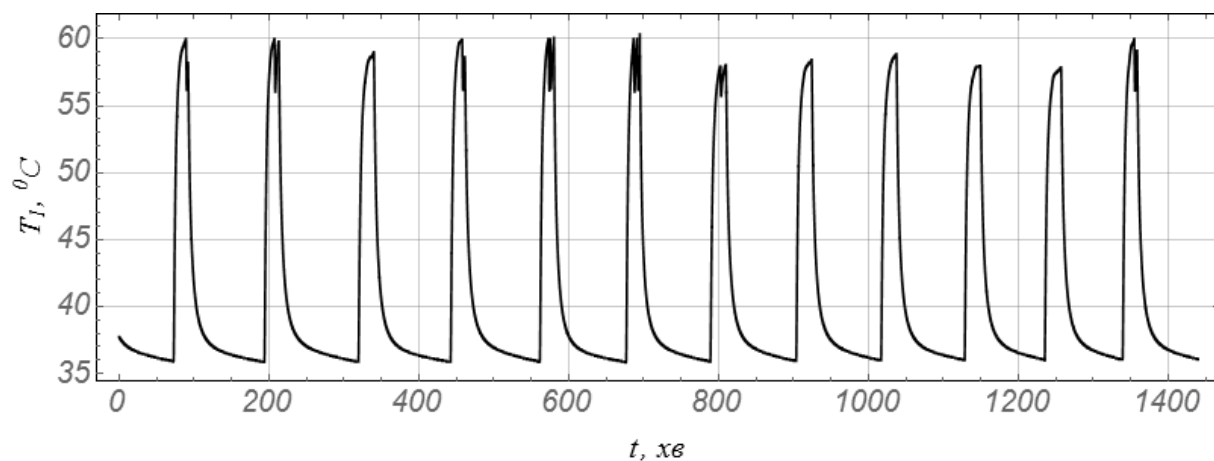


Рис. Д.6.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій нижній лопаті лопатевої мішалки

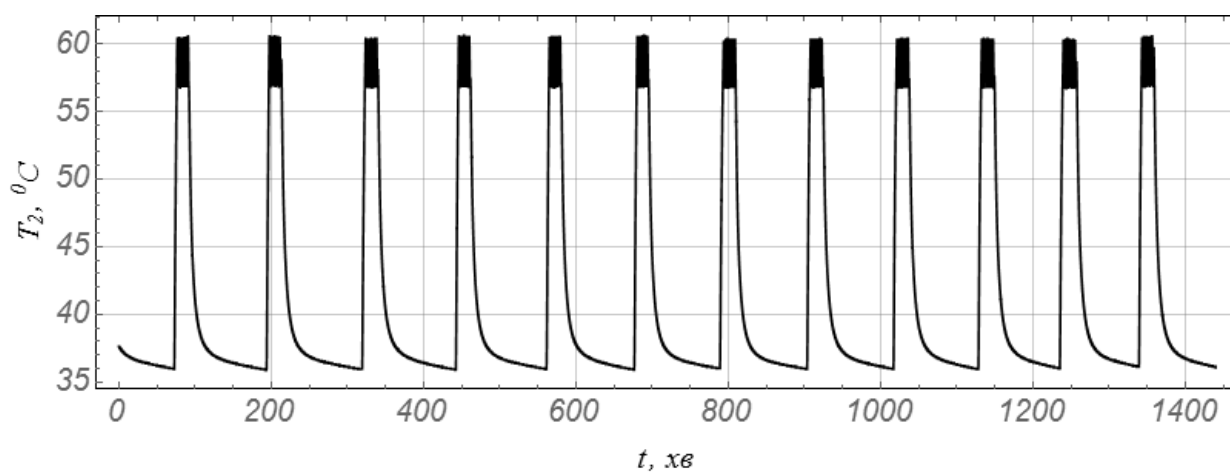


Рис. Д.6.4. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій нижній лопаті лопатевої мішалки

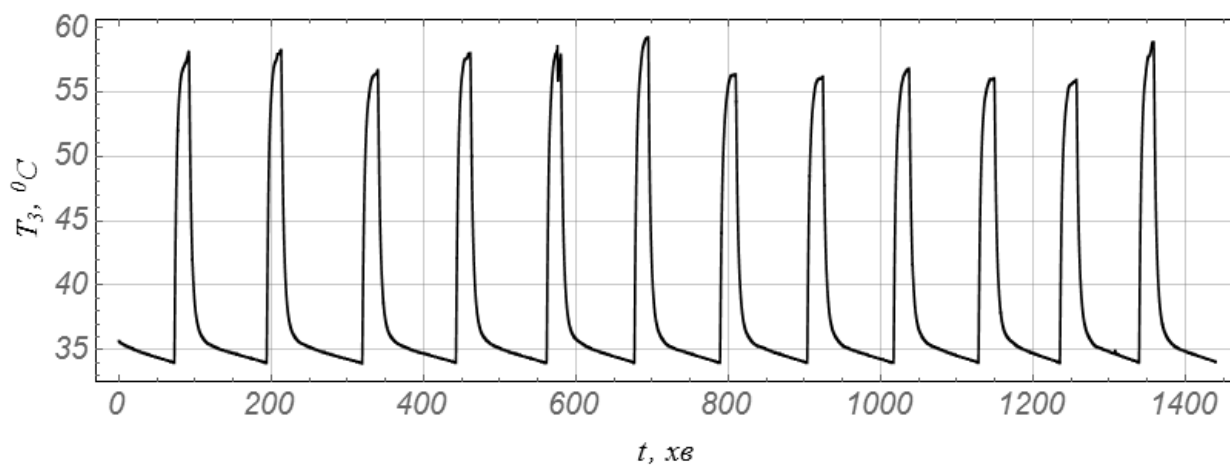


Рис. Д.6.5. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій верхній лопаті лопатевої мішалки

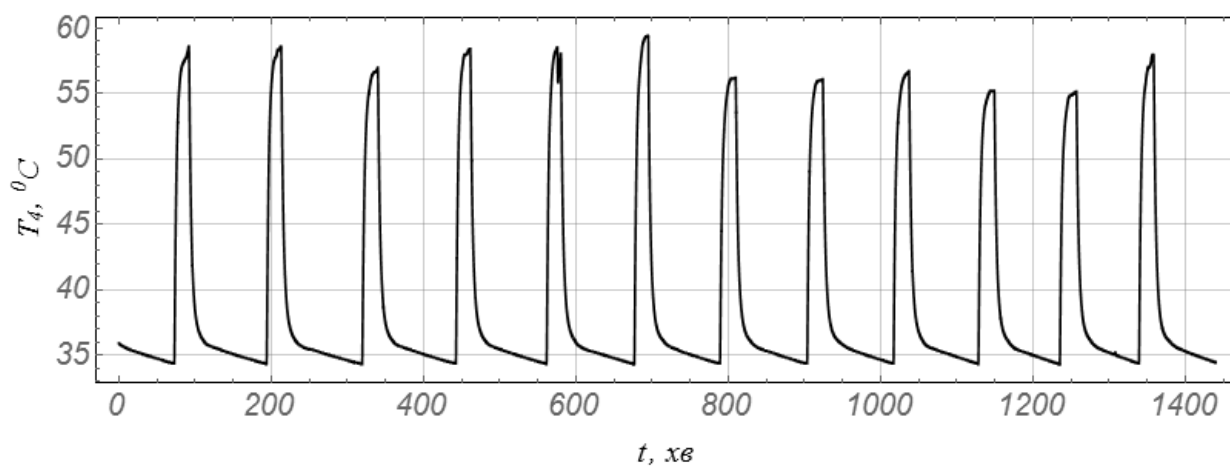


Рис. Д.6.6. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій верхній лопаті лопатевої мішалки

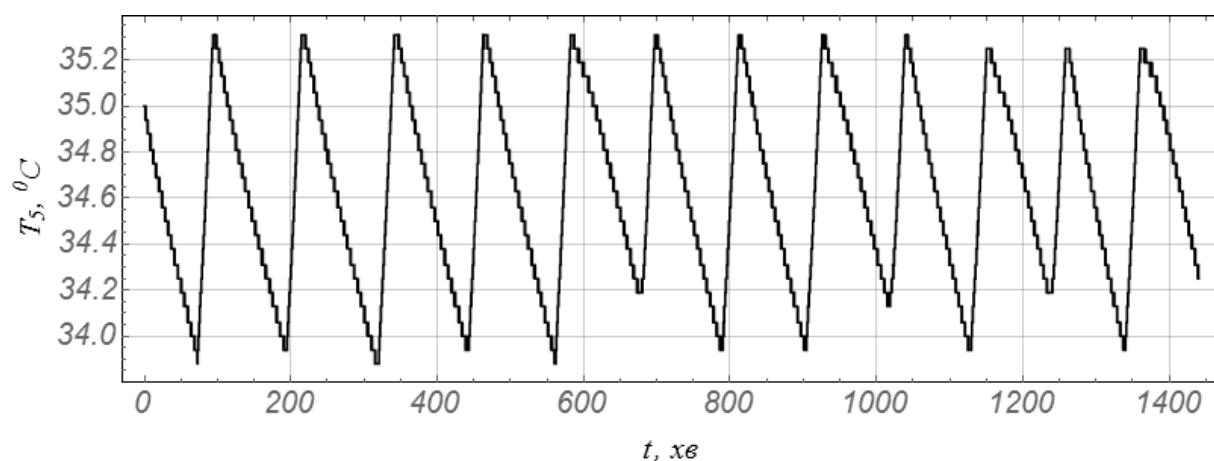


Рис. Д.6.7. Графік зміни температури стінки біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

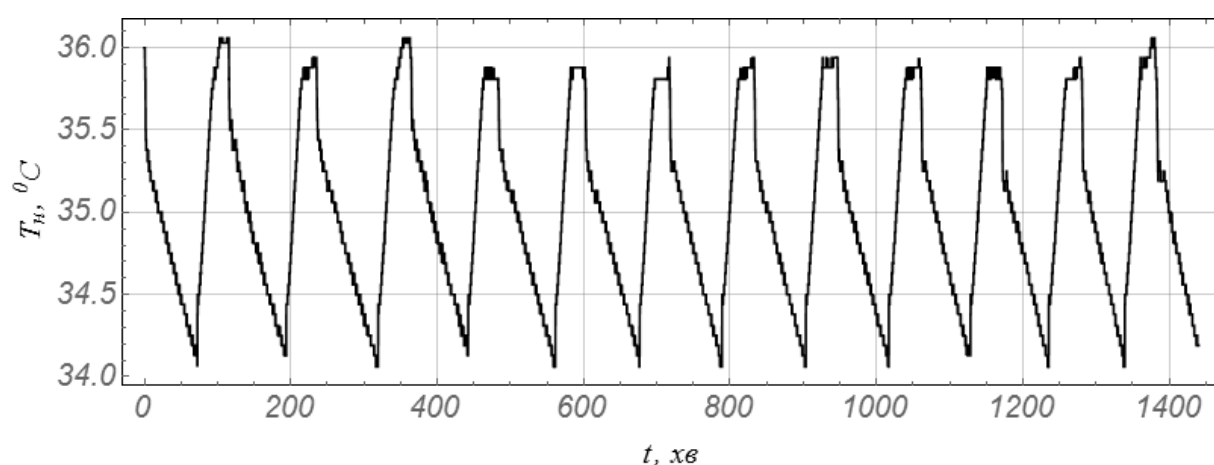


Рис. Д.6.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

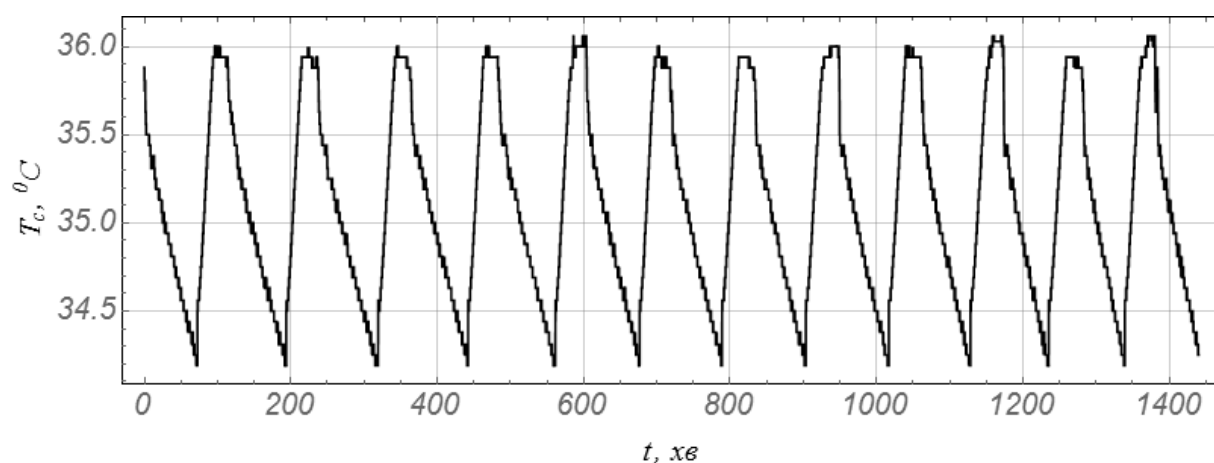


Рис. Д.6.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

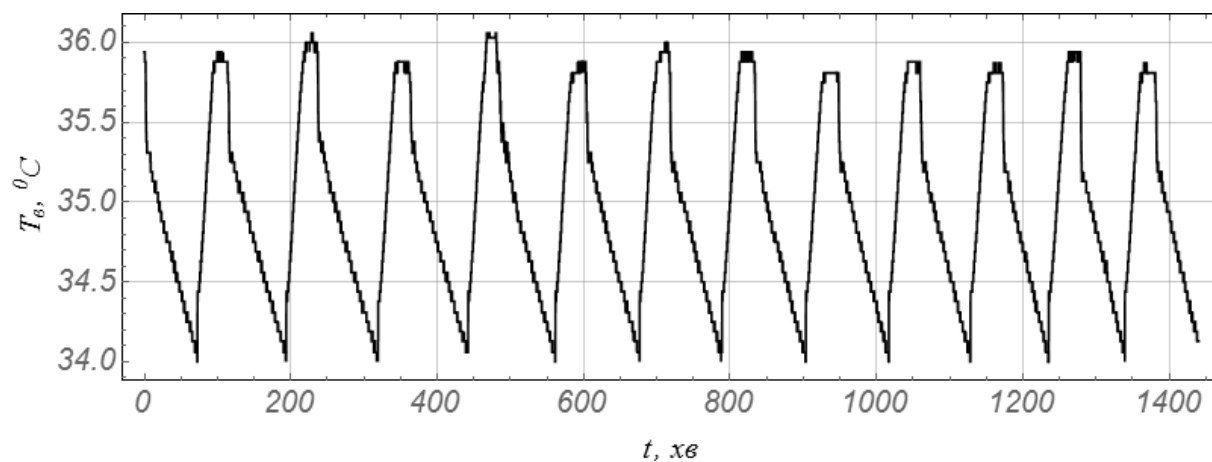


Рис. Д.6.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

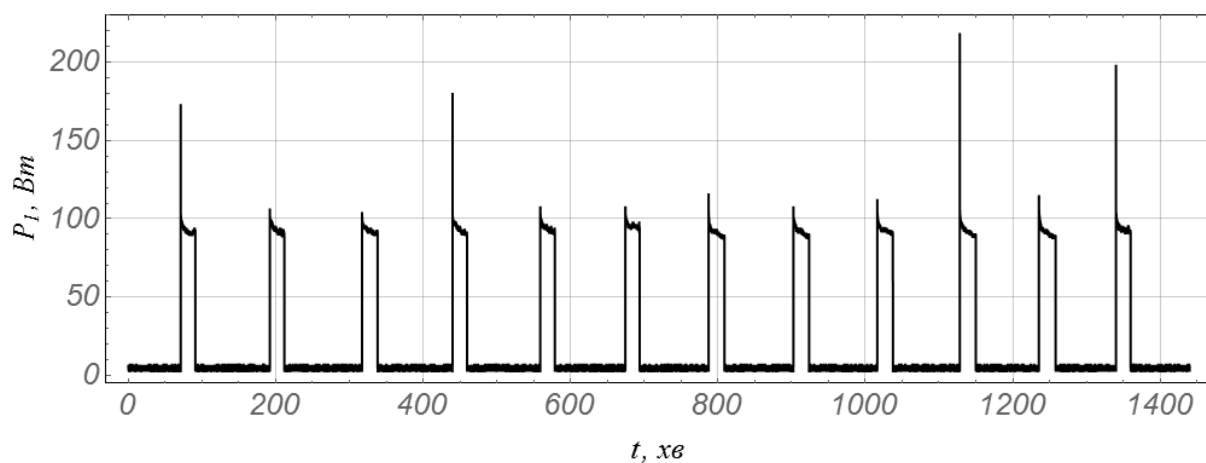


Рис. Д.6.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

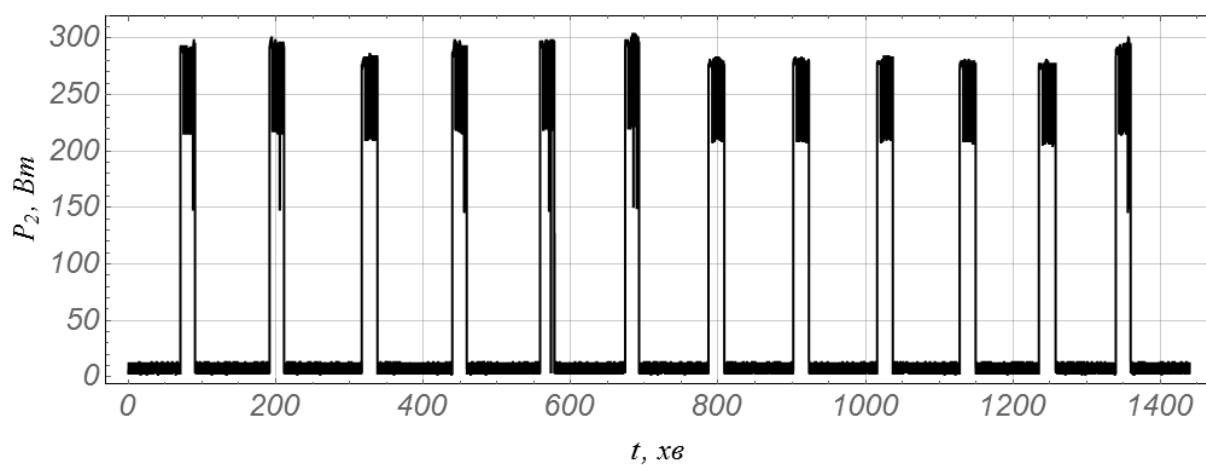


Рис. Д.6.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним у лопатях лопатевої мішалки

Д.7. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактору (4 доба)

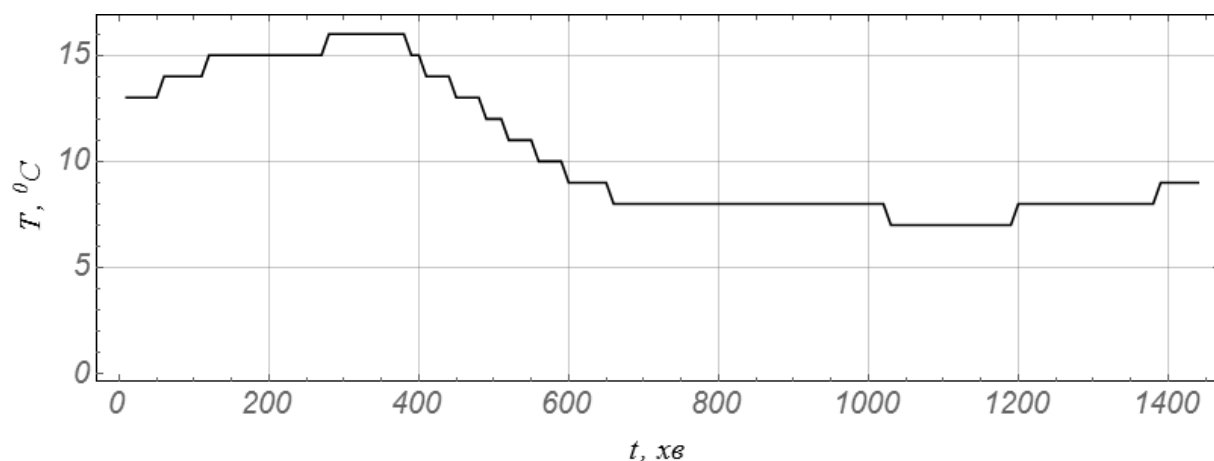


Рис. Д.7.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

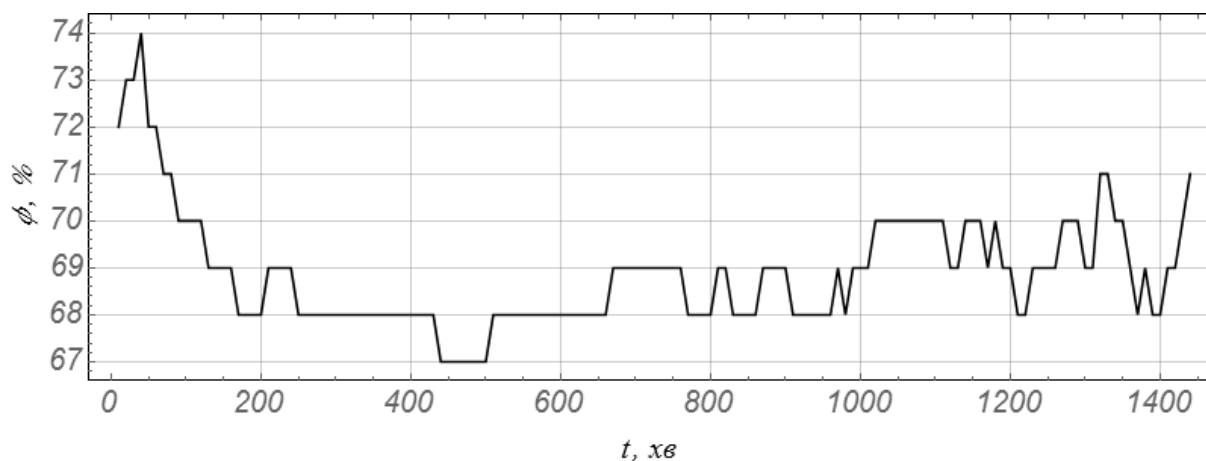


Рис. Д.7.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

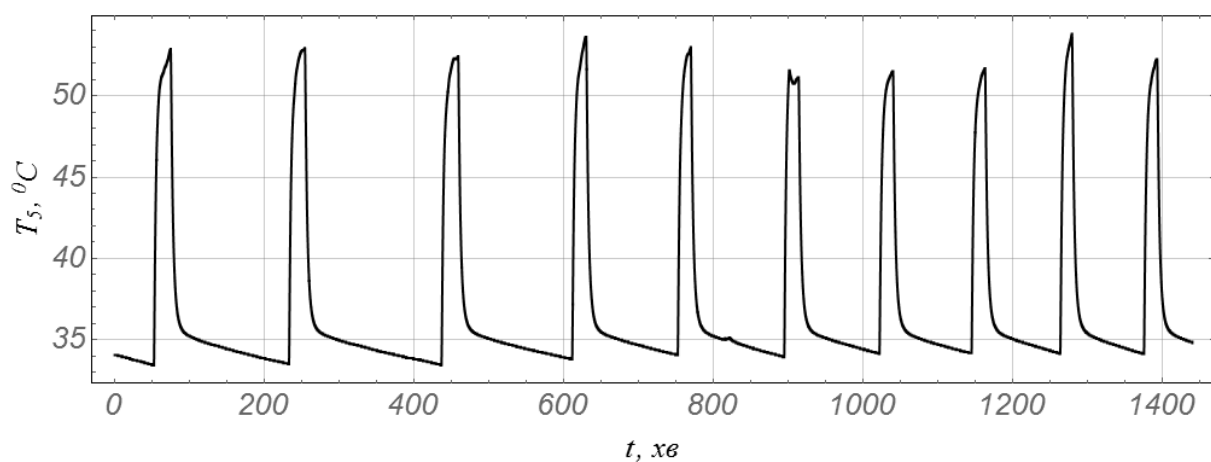


Рис. Д.7.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного на зовнішній стінці біогазового реактора

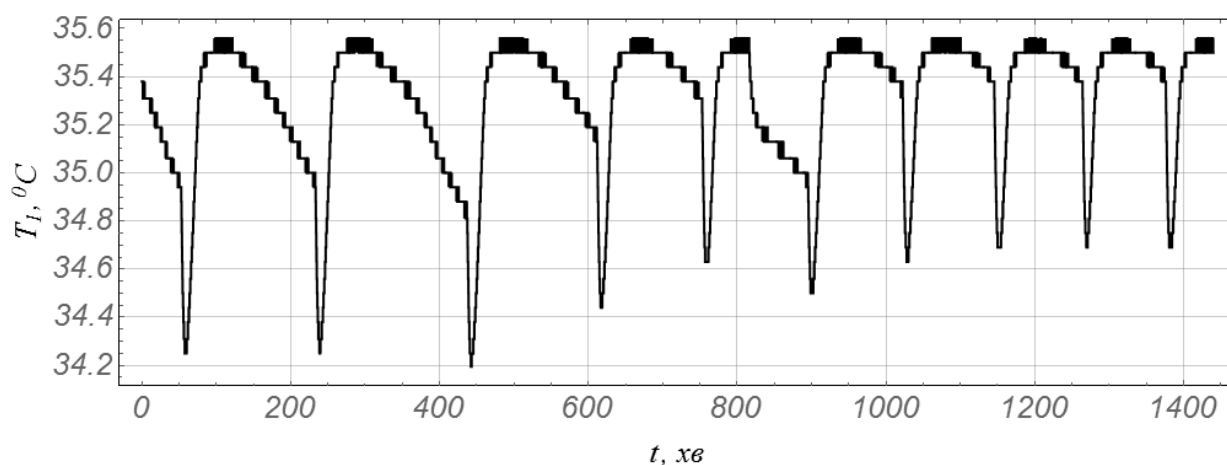


Рис. Д.7.4. Графік зміни температури першої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

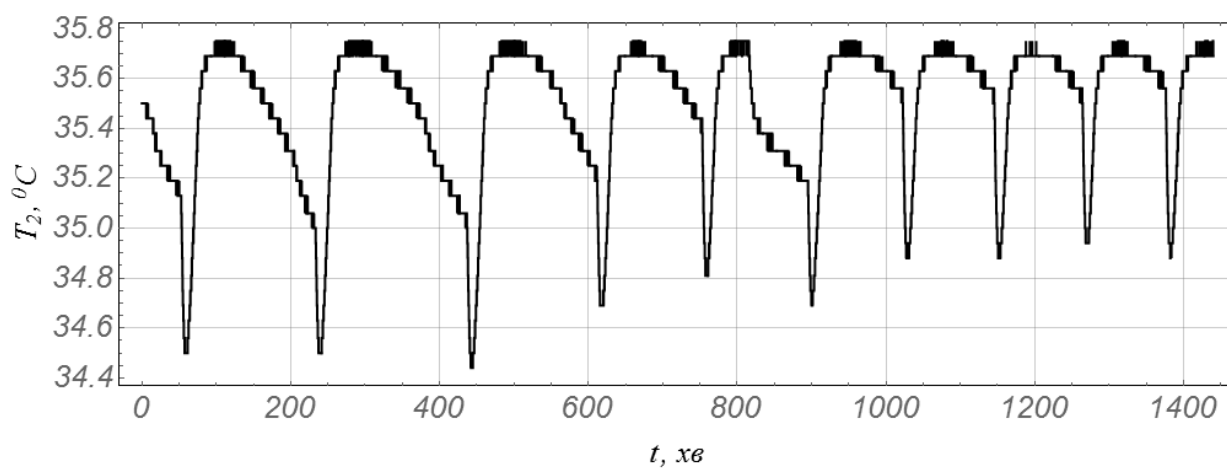


Рис. Д.7.5. Графік зміни температури другої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

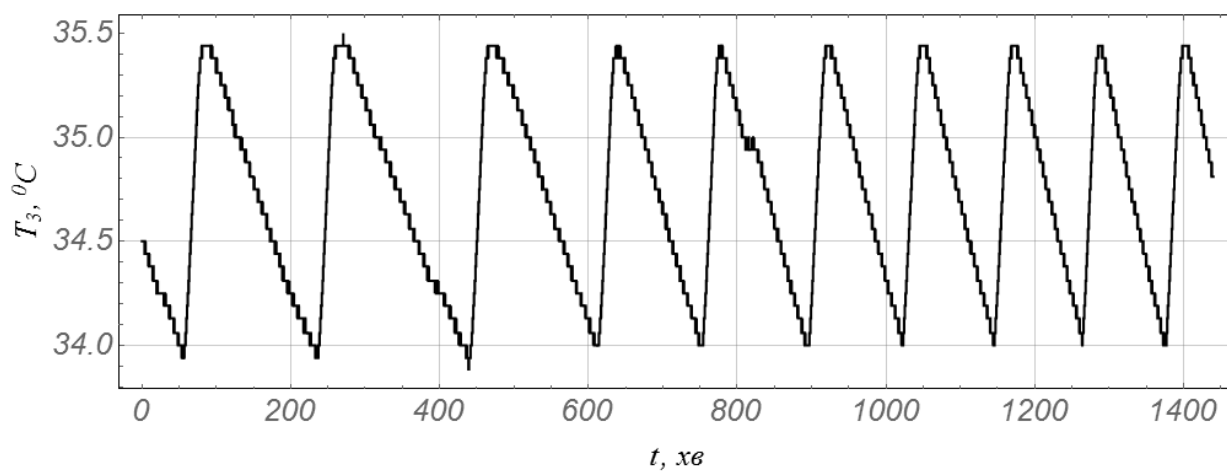


Рис. Д.7.6. Графік зміни температури першої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

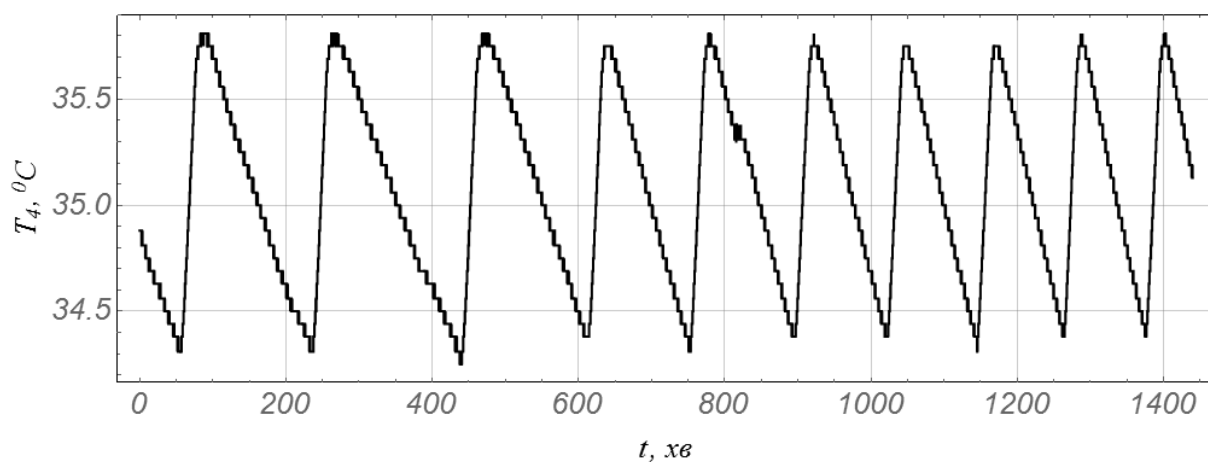


Рис. Д.7.7. Графік зміни температури другої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

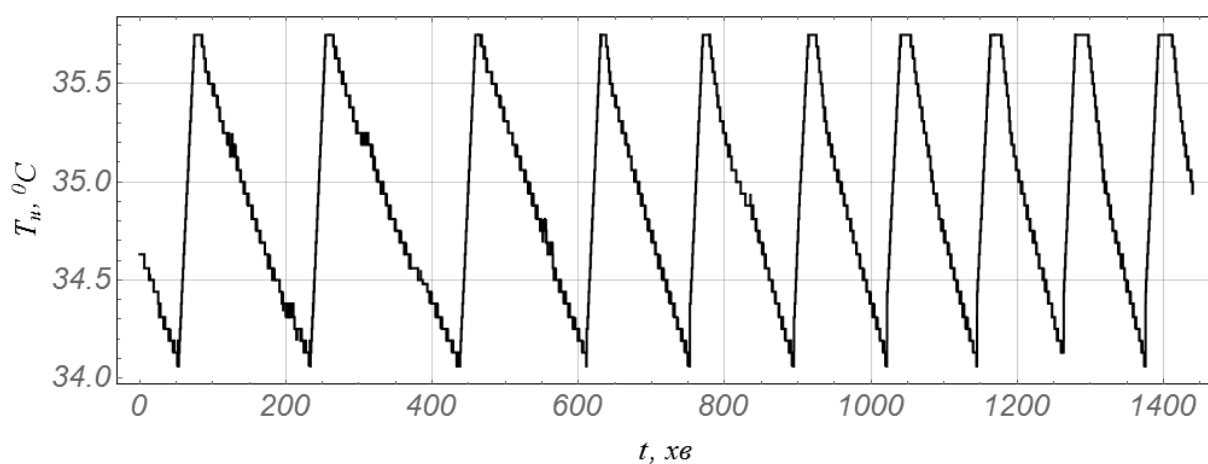


Рис. Д.7.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

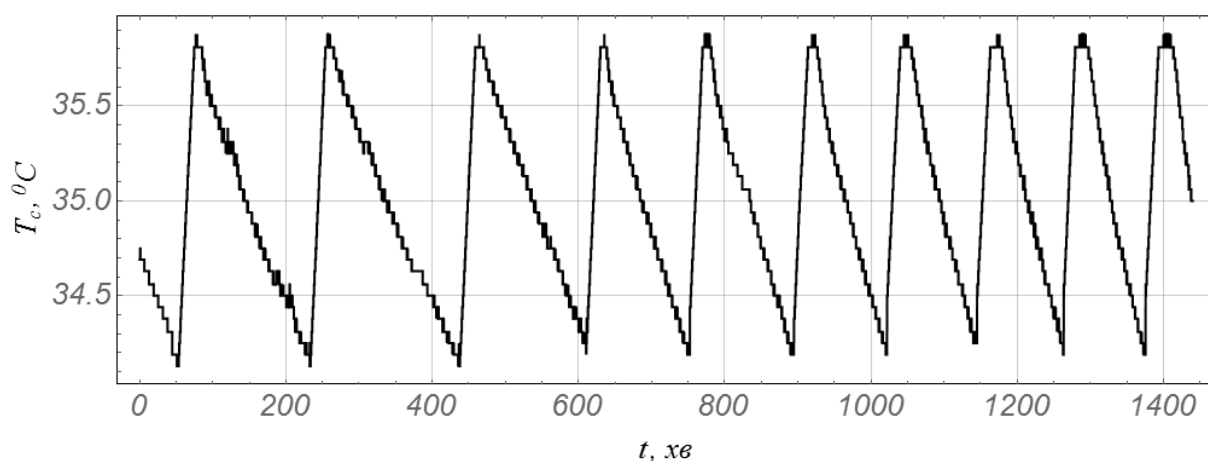


Рис. Д.7.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

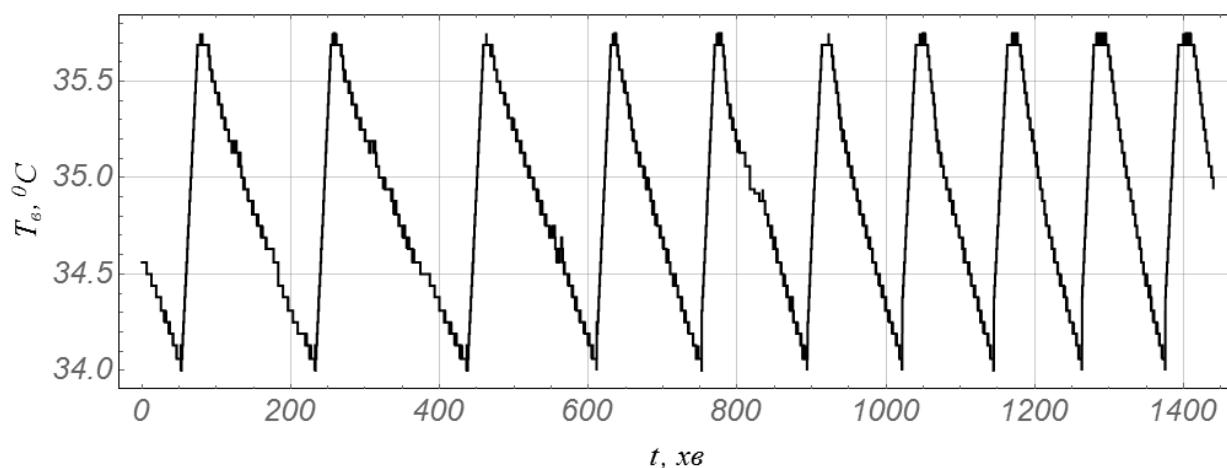


Рис. Д.7.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

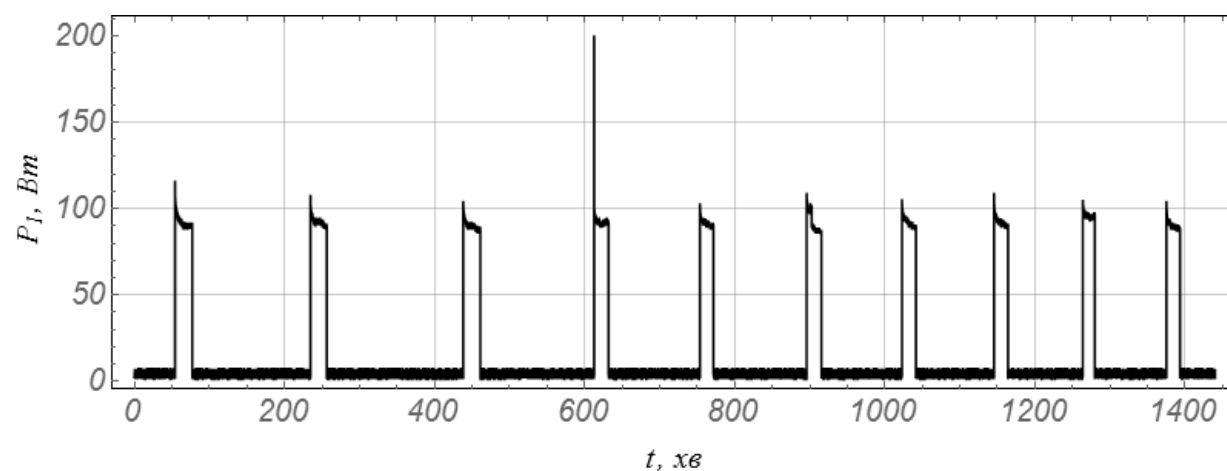


Рис. Д.7.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

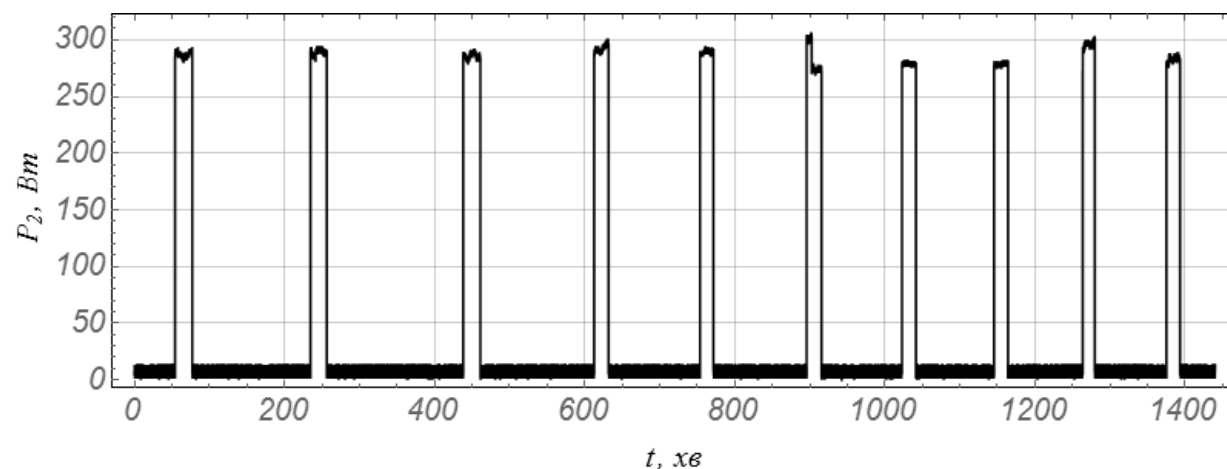


Рис. Д.7.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора

Д.8. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки (4 доба)

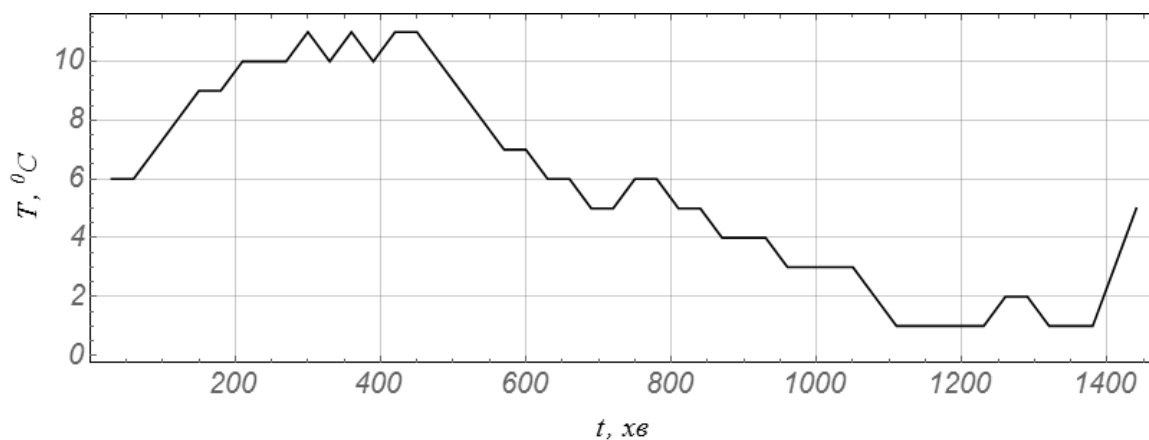


Рис. Д.8.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

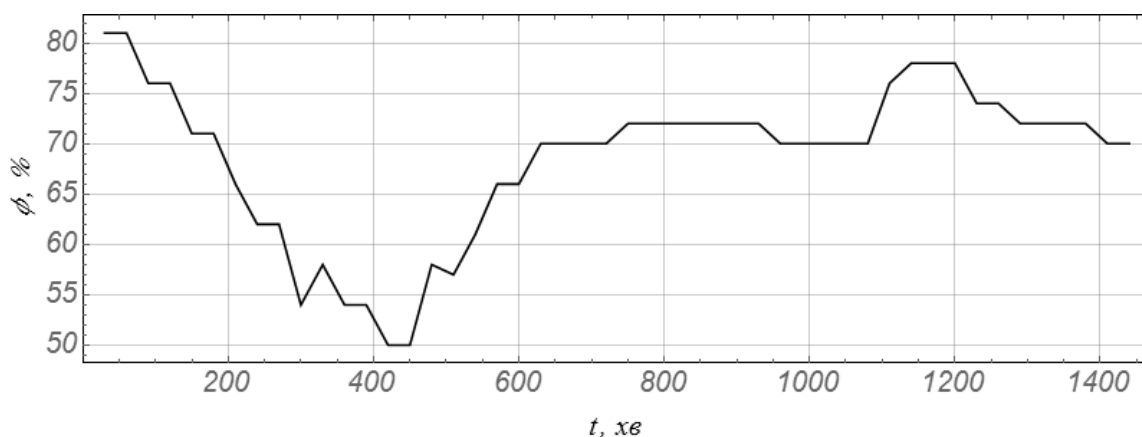


Рис. Д.8.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

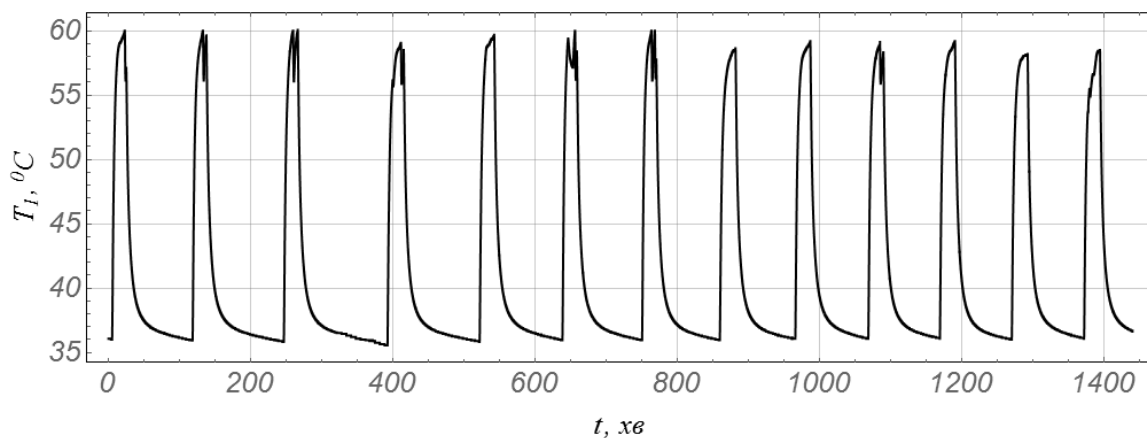


Рис. Д.8.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій нижній лопаті лопатевої мішалки

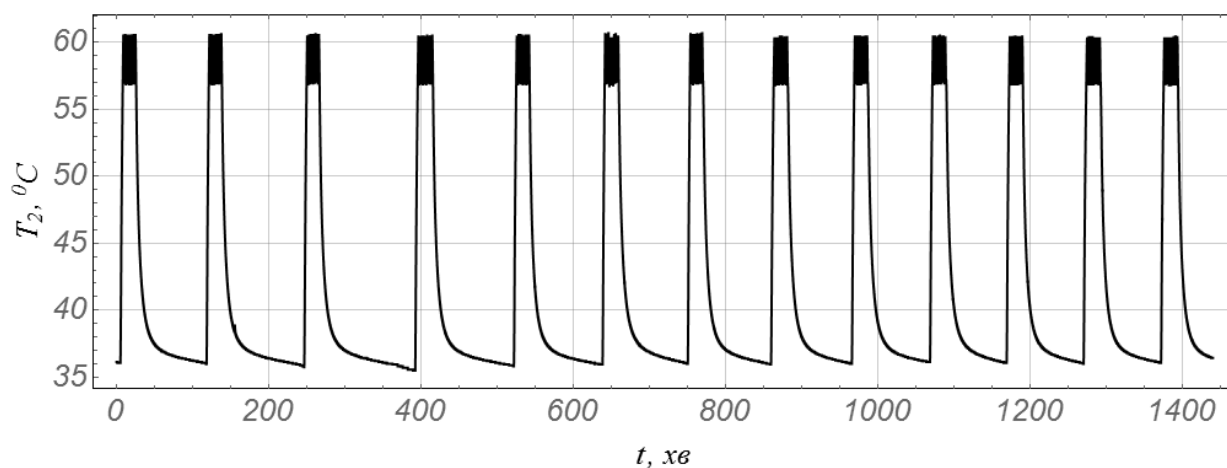


Рис. Д.8.4. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій нижній лопаті лопатевої мішалки

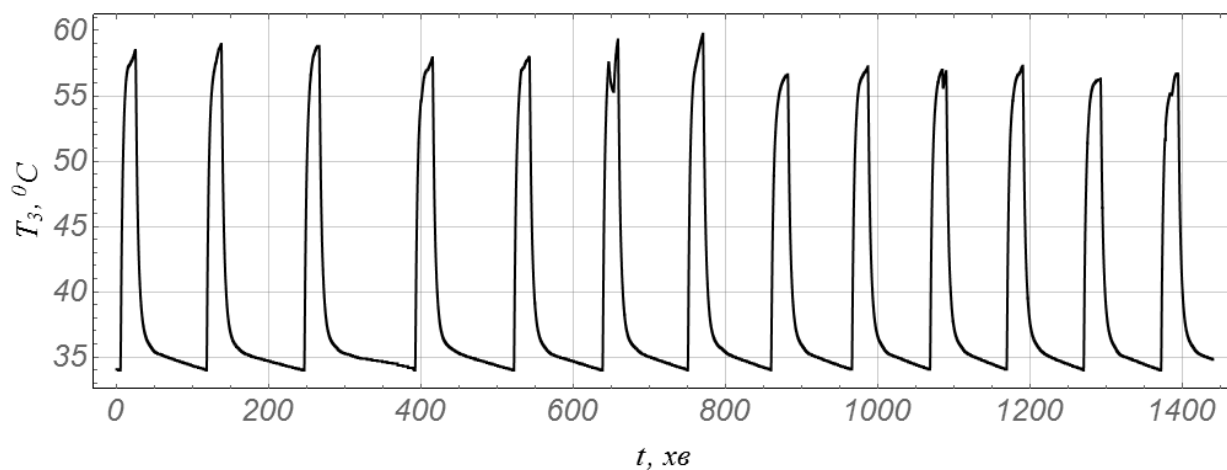


Рис. Д.8.5. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій верхній лопаті лопатевої мішалки

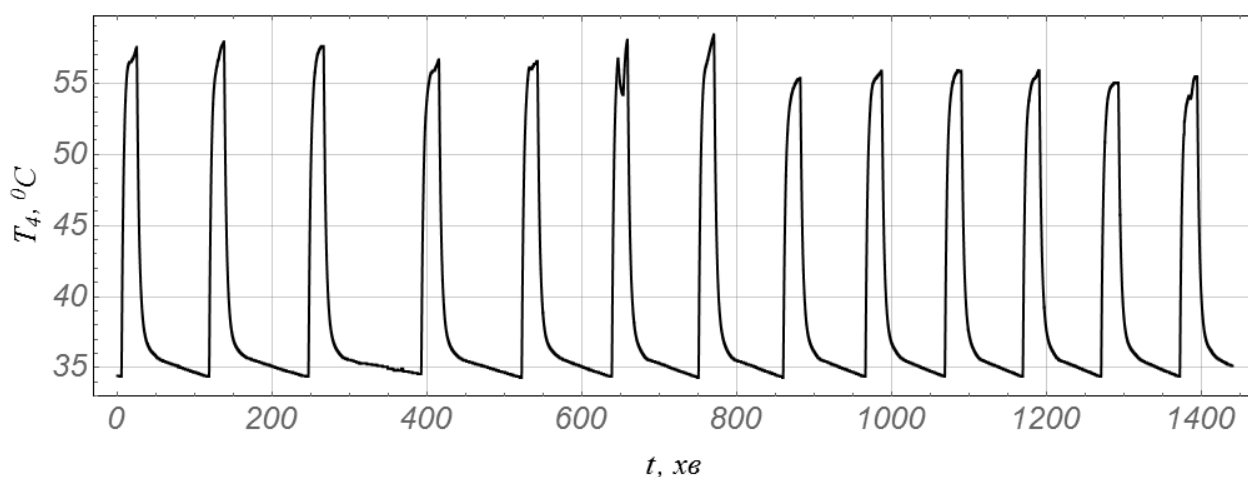


Рис. Д.8.6. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій верхній лопаті лопатевої мішалки

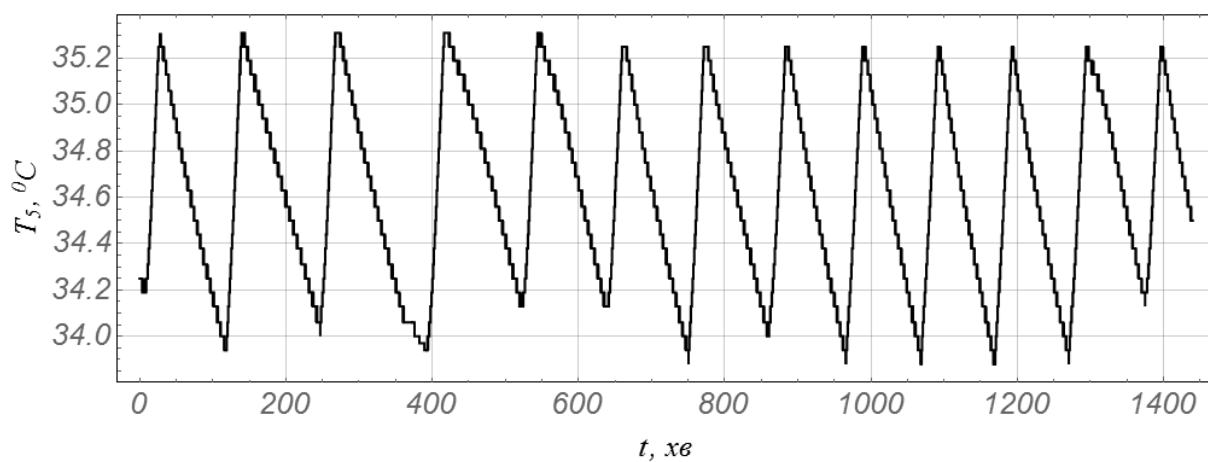


Рис. Д.8.7. Графік зміни температури стінки біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

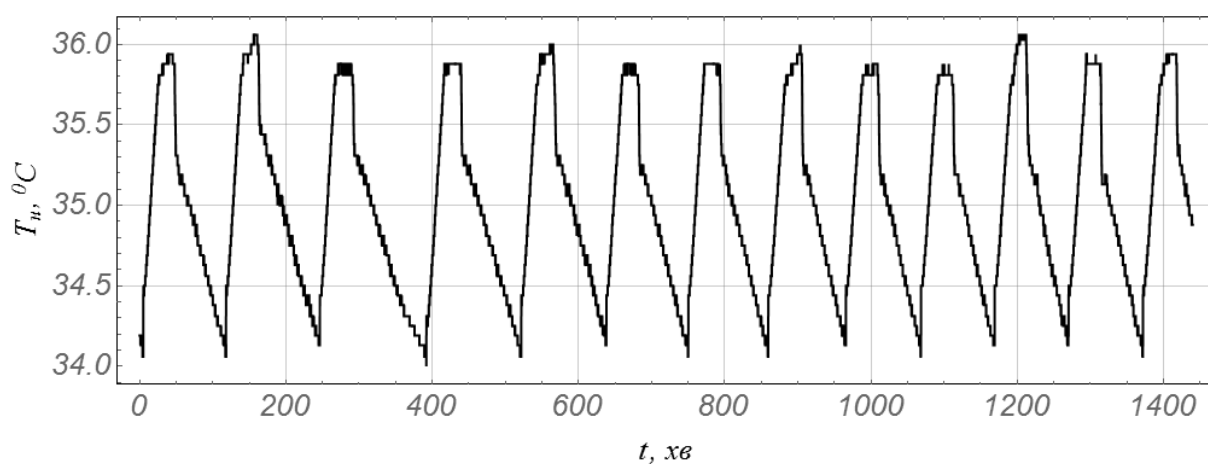


Рис. Д.8.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

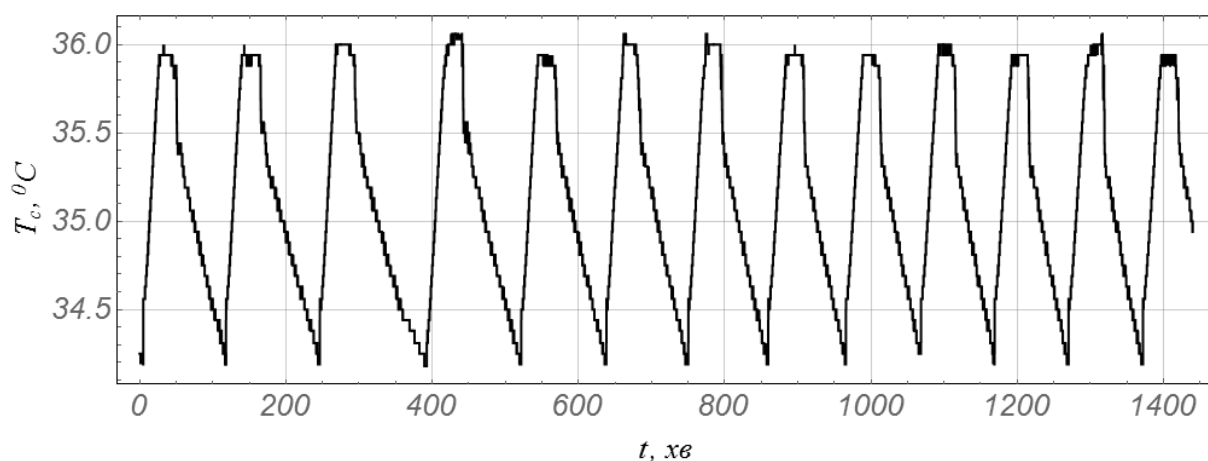


Рис. Д.8.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

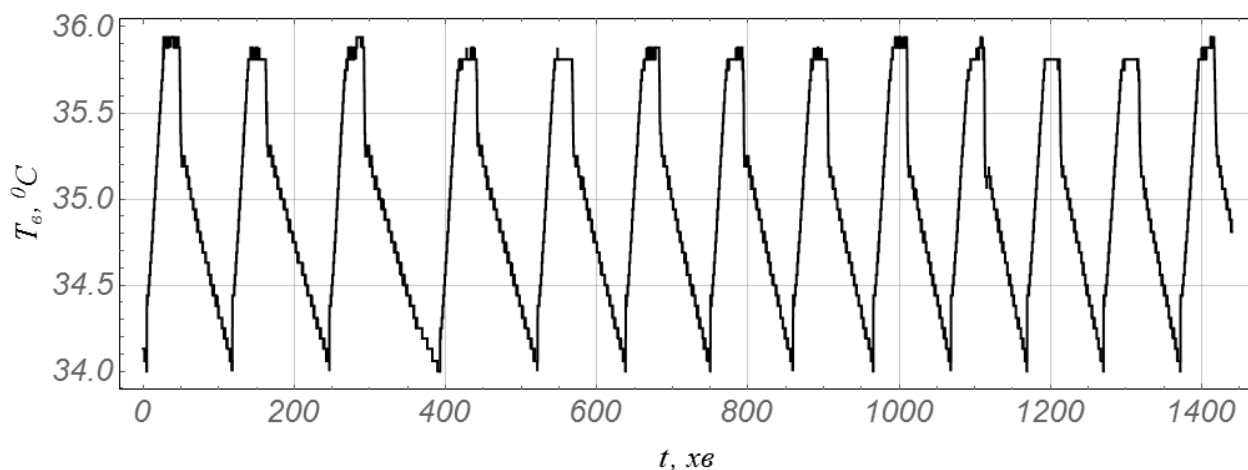


Рис. Д.8.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

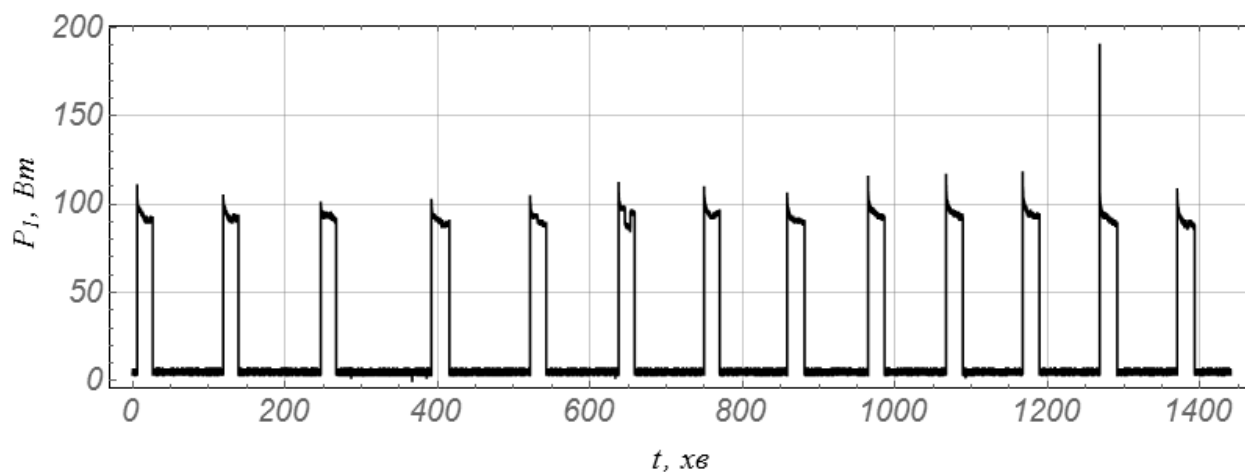


Рис. Д.8.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

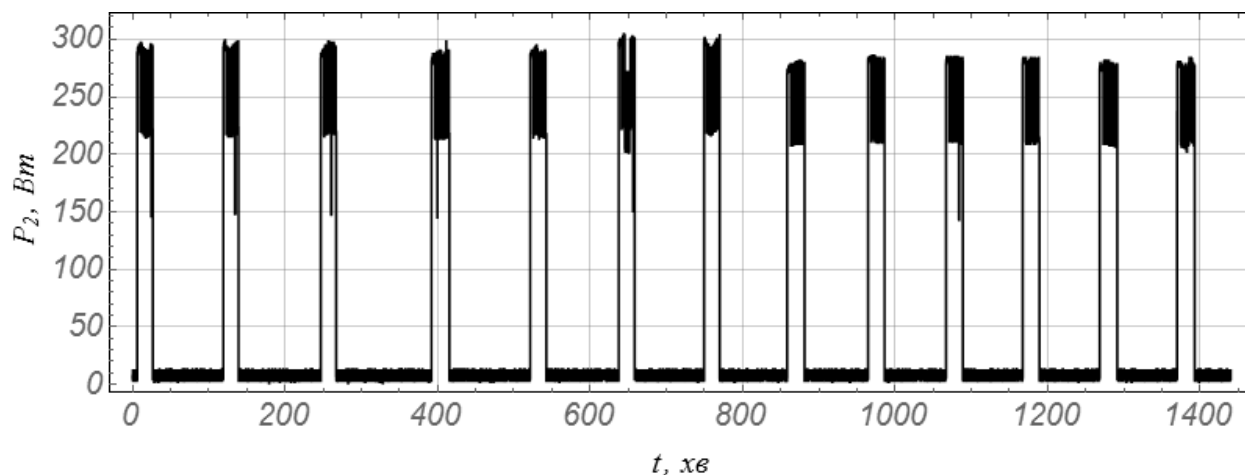


Рис. Д.8.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним у лопатях лопатевої мішалки

Д.9. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактору (5 доба)

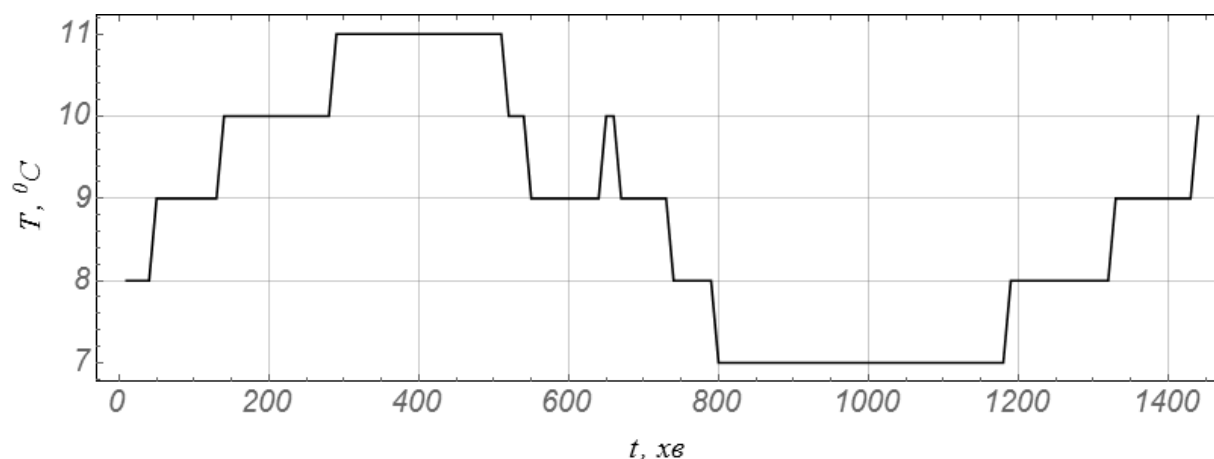


Рис. Д.9.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

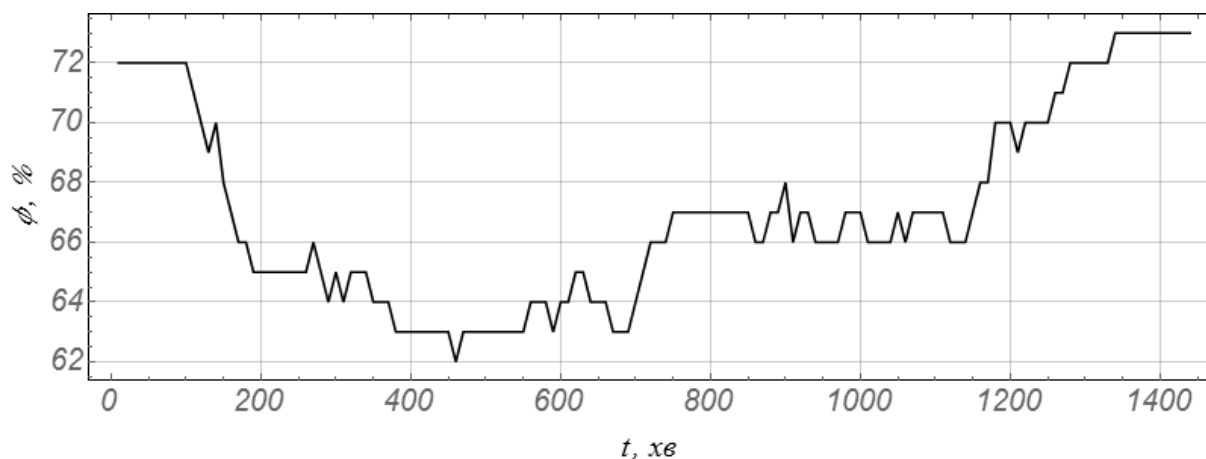


Рис. Д.9.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

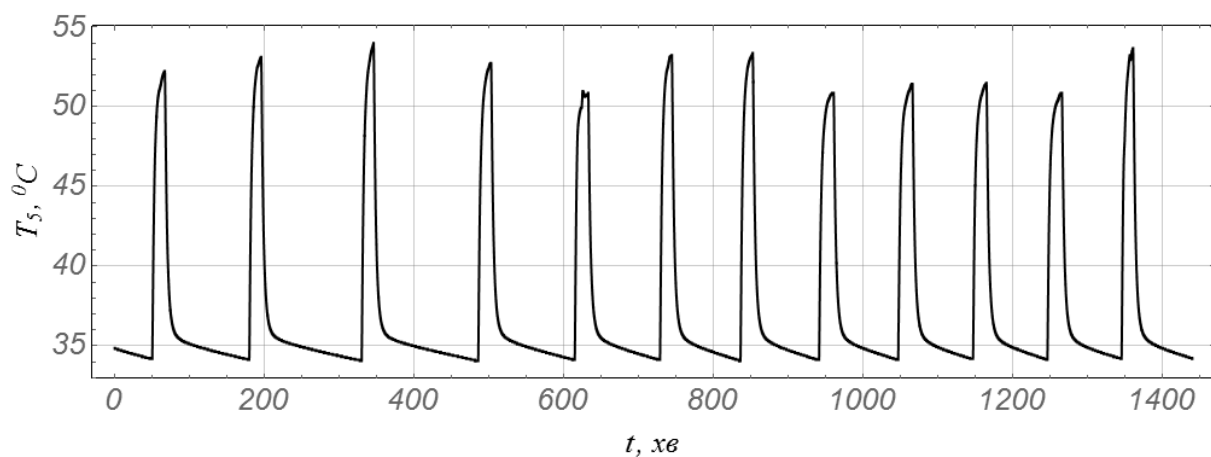


Рис. Д.9.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного на зовнішній стінці біогазового реактора

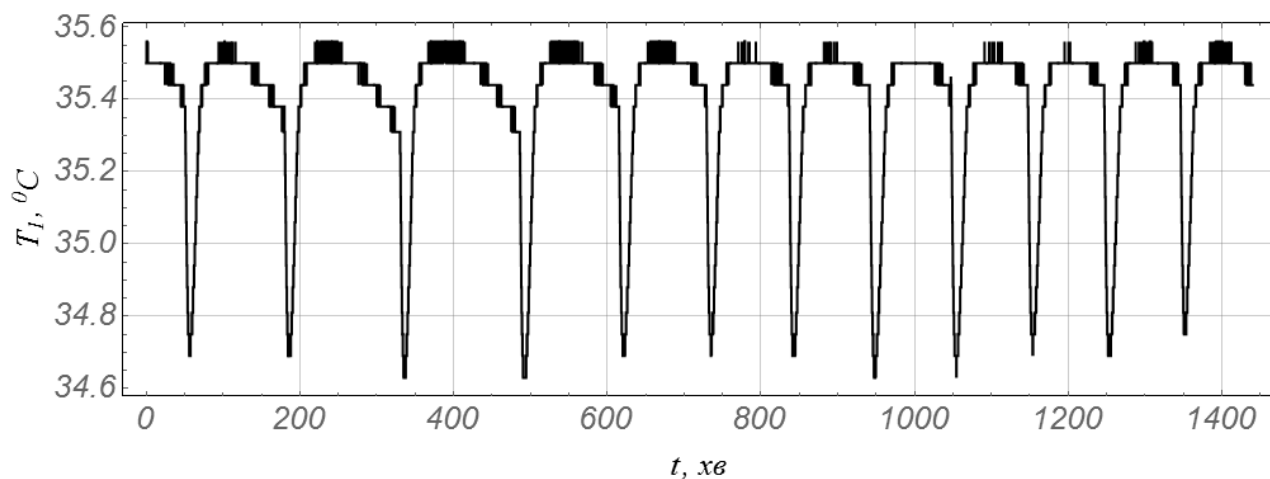


Рис. Д.9.4. Графік зміни температури першої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

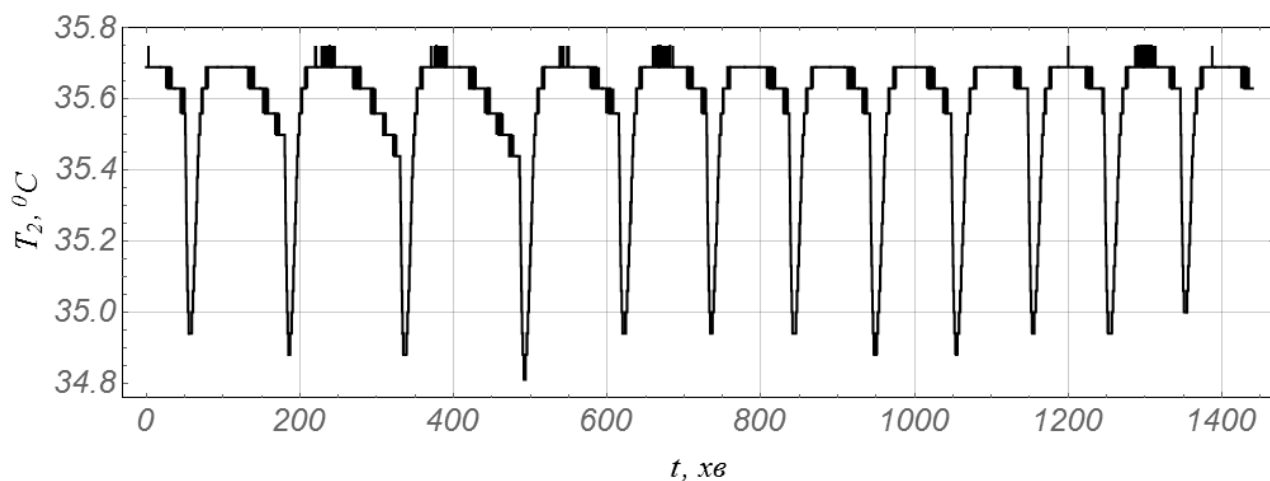


Рис. Д.9.5. Графік зміни температури другої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

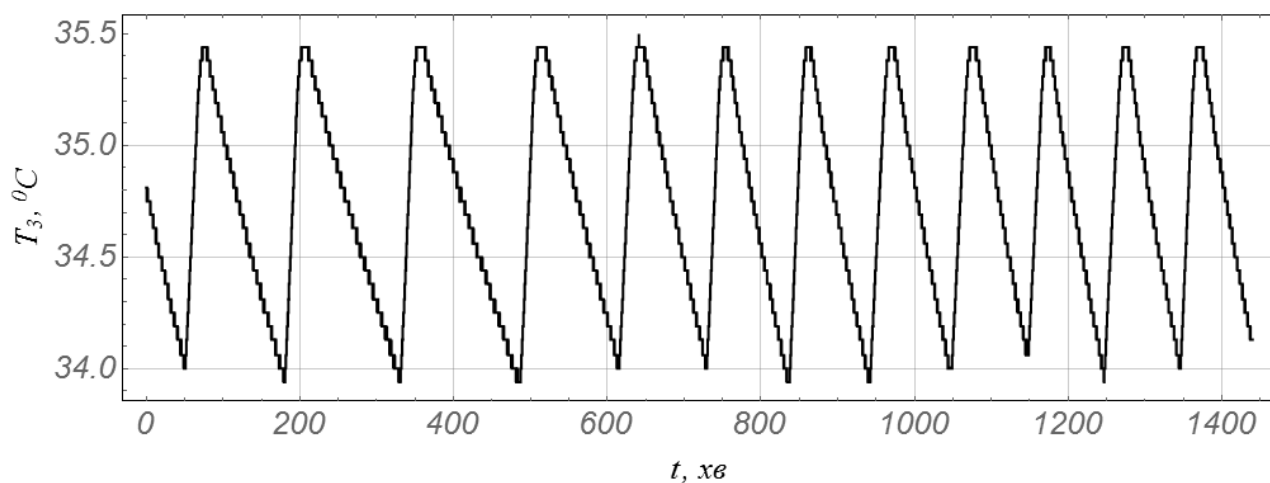


Рис. Д.9.6. Графік зміни температури першої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

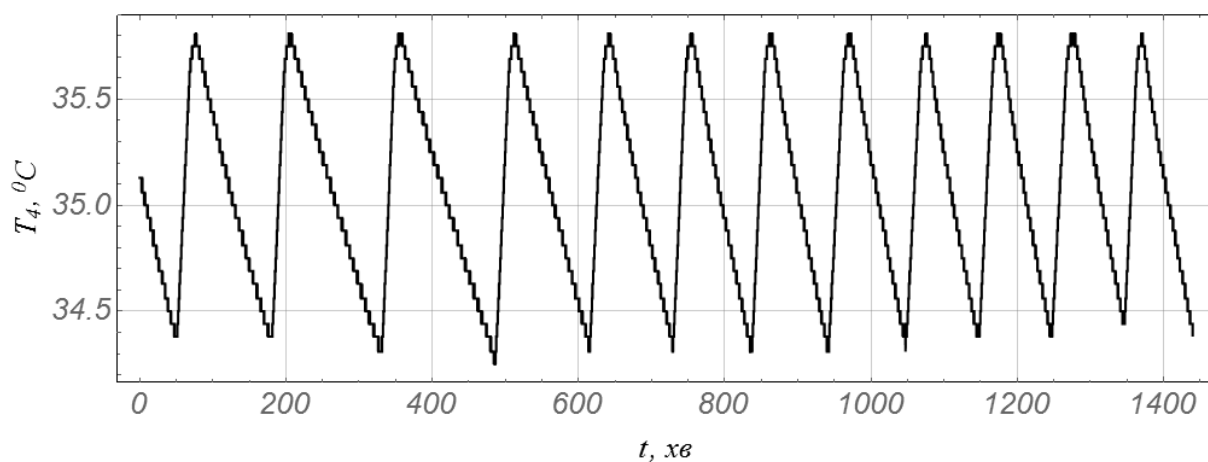


Рис. Д.9.7. Графік зміни температури другої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

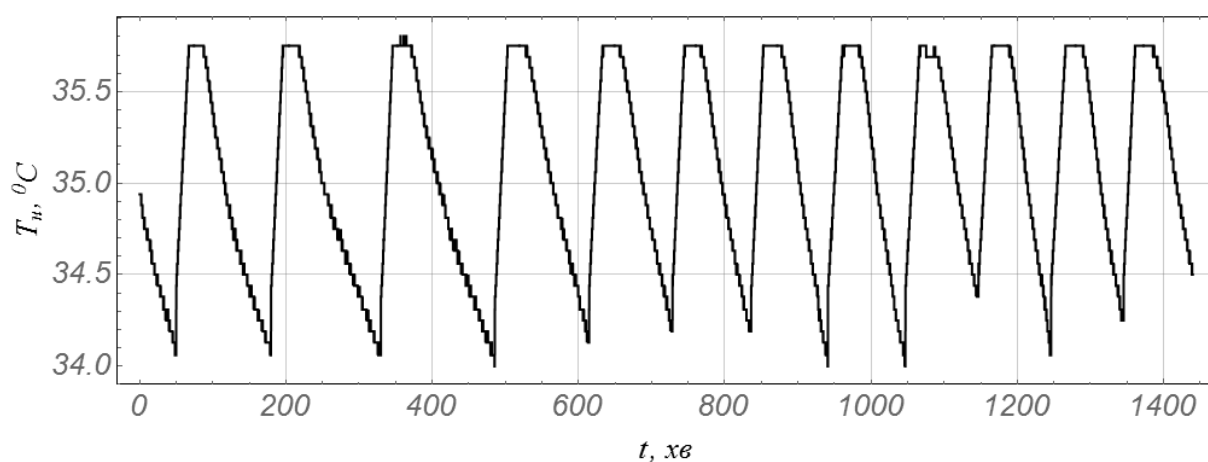


Рис. Д.9.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

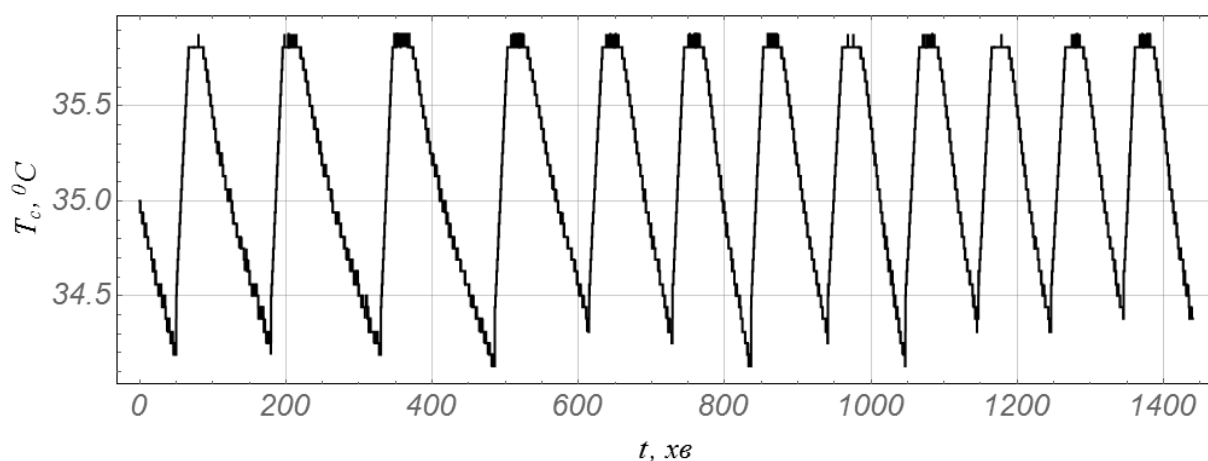


Рис. Д.9.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

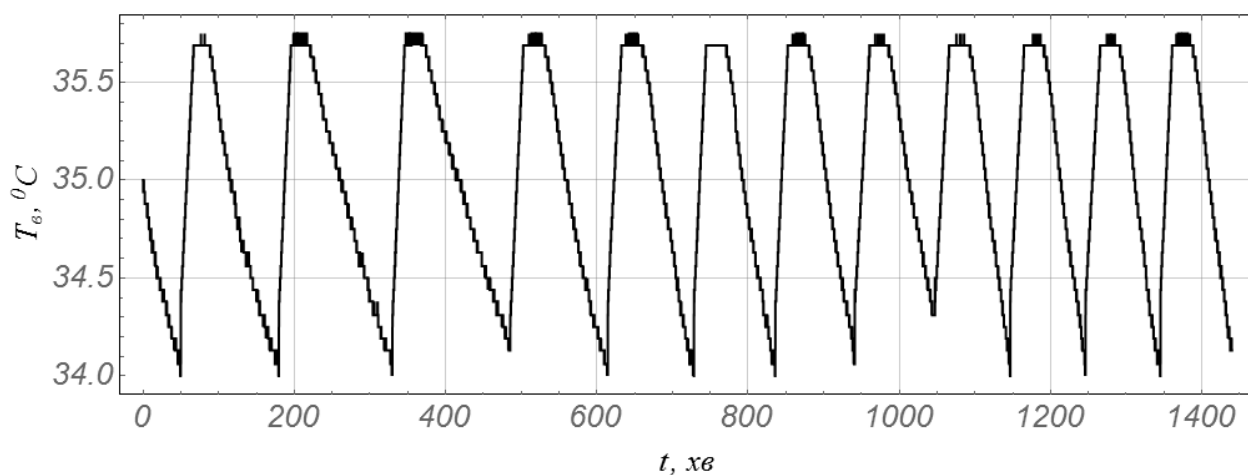


Рис. Д.9.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

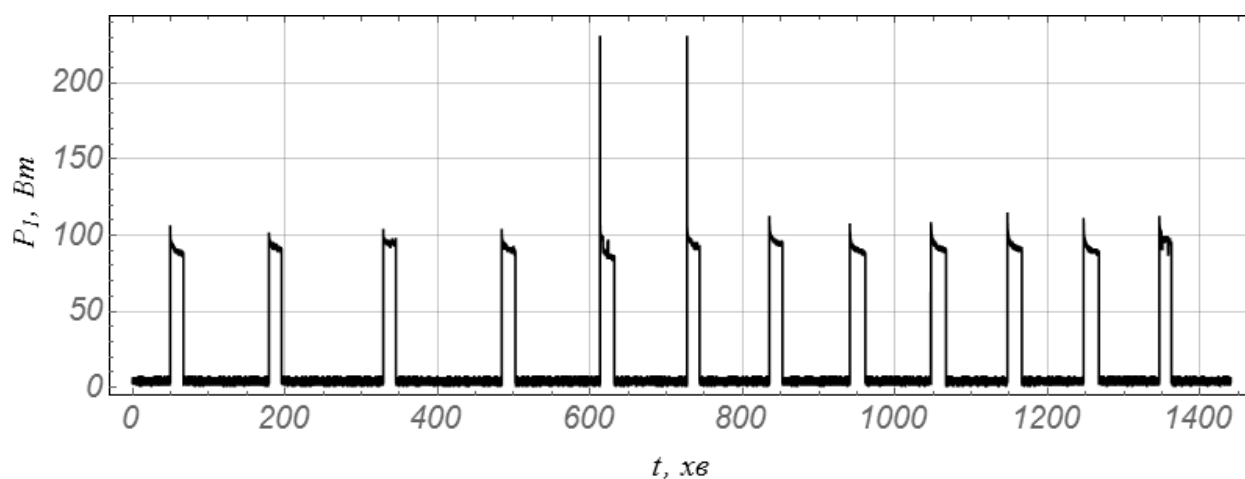


Рис. Д.9.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

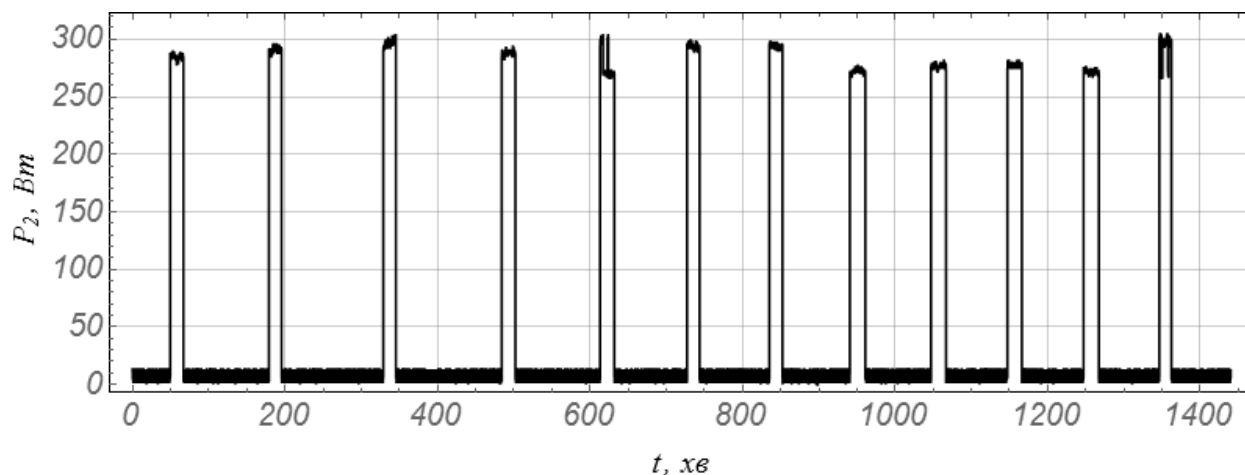


Рис. Д.9.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора

Д.10. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки (5 доба)

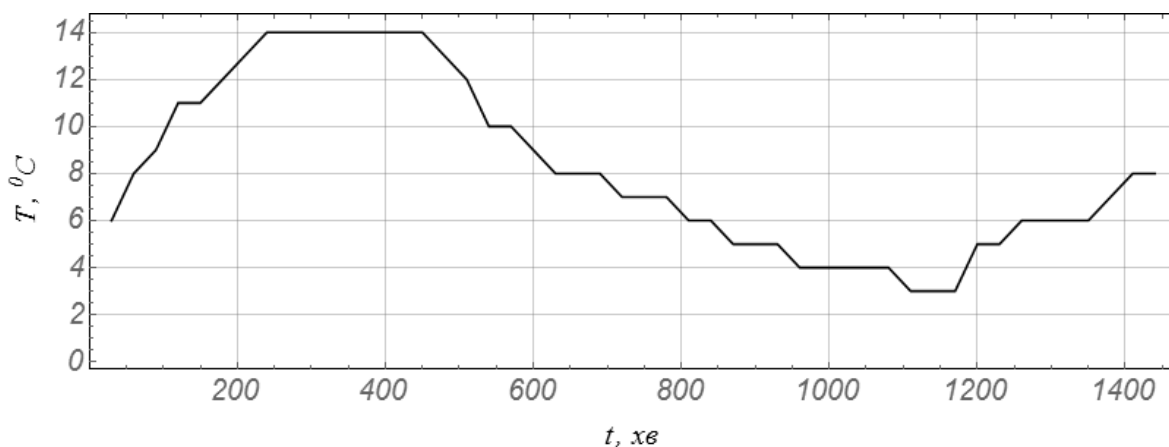


Рис. Д.10.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

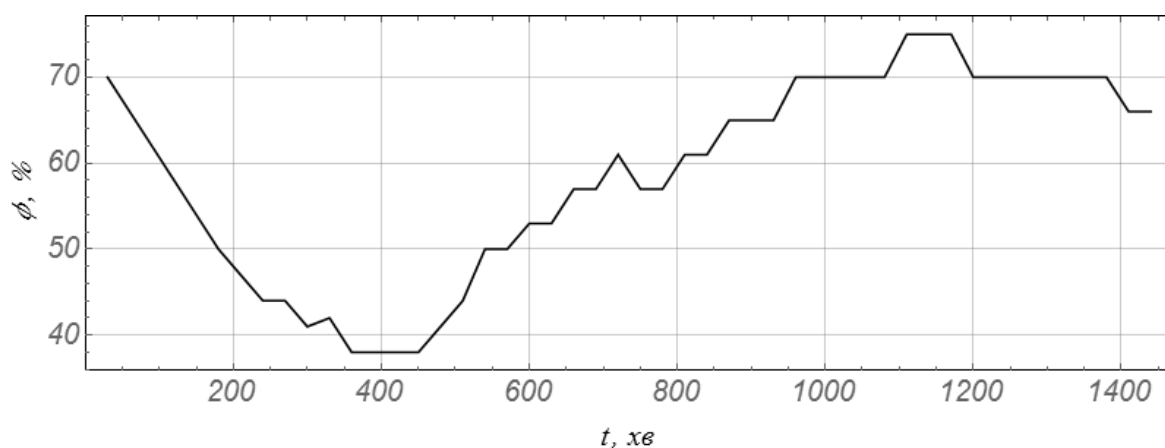


Рис. Д.10.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

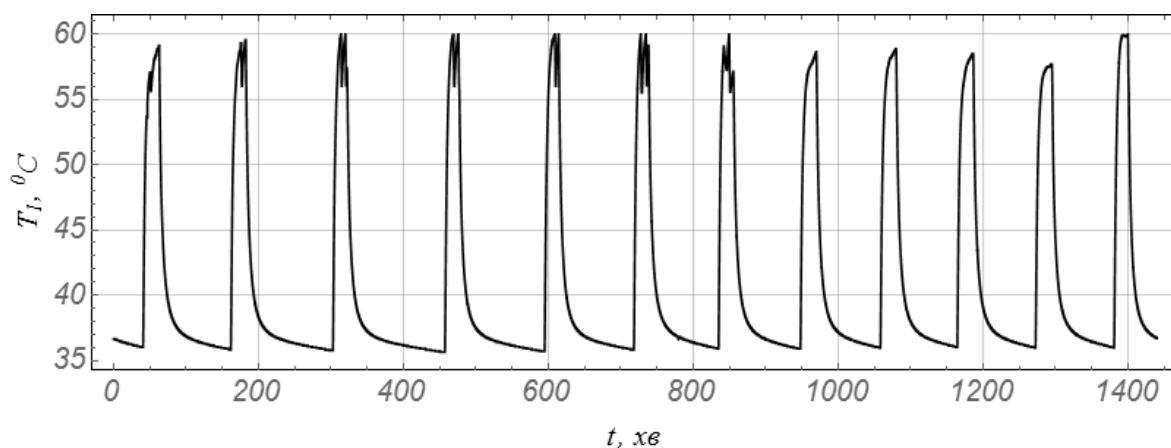


Рис. Д.10.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій нижній лопаті лопатевої мішалки

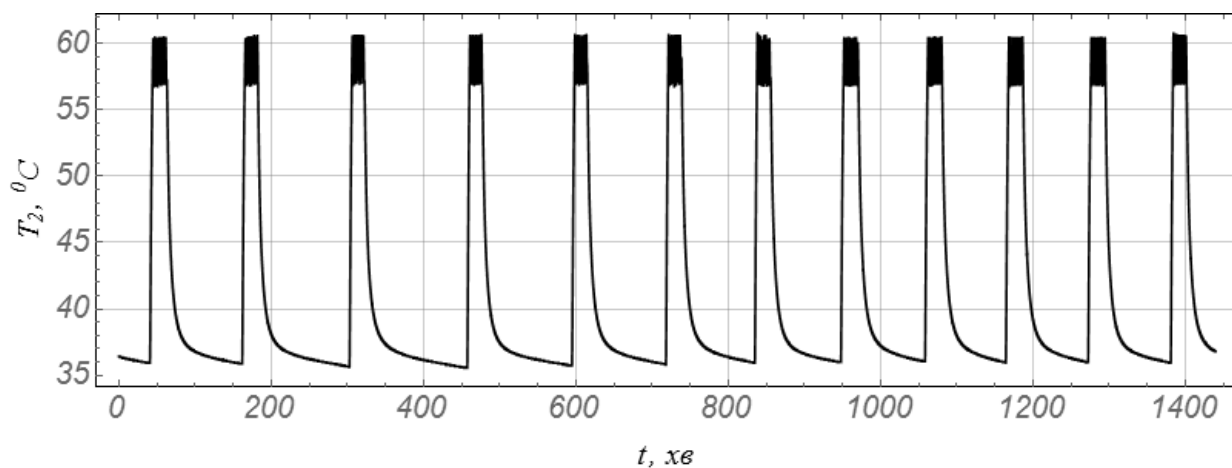


Рис. Д.10.4. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій нижній лопаті лопатевої мішалки

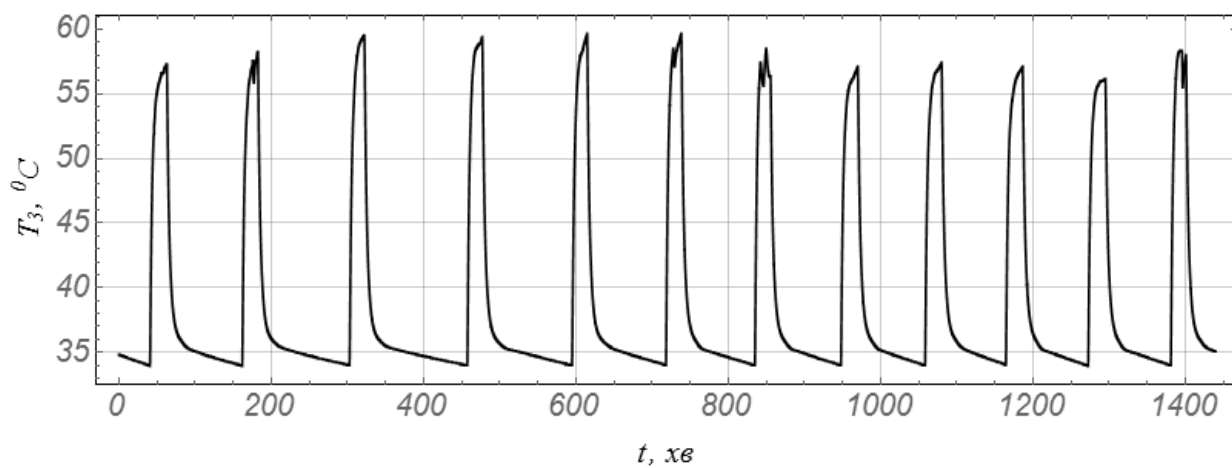


Рис. Д.10.5. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій верхній лопаті лопатевої мішалки

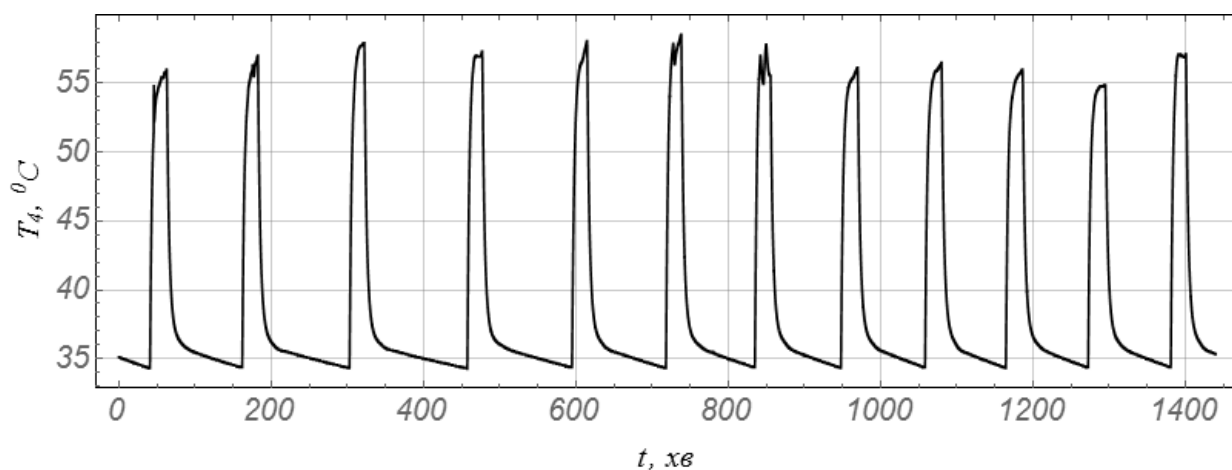


Рис. Д.10.6. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій верхній лопаті лопатевої мішалки

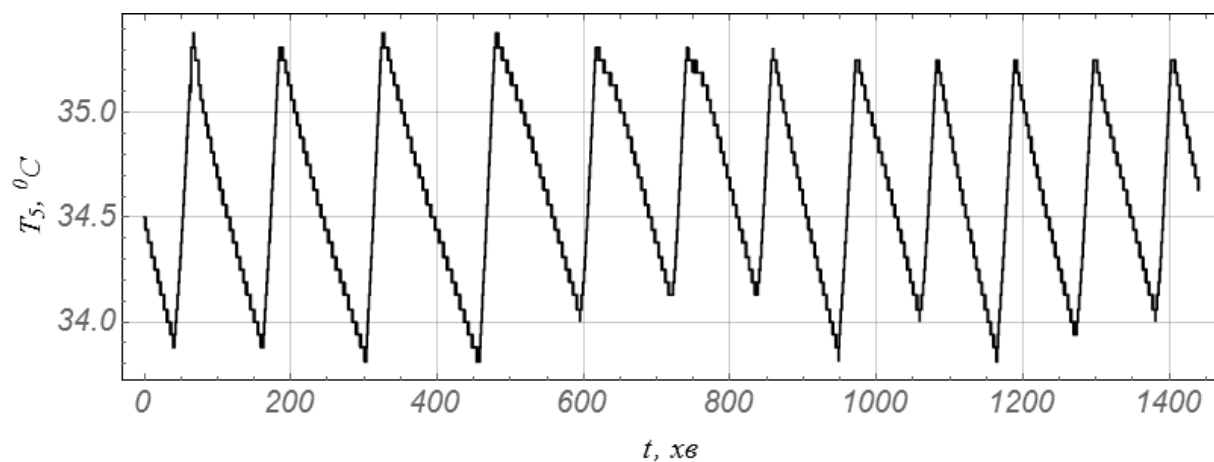


Рис. Д.10.7. Графік зміни температури стінки біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

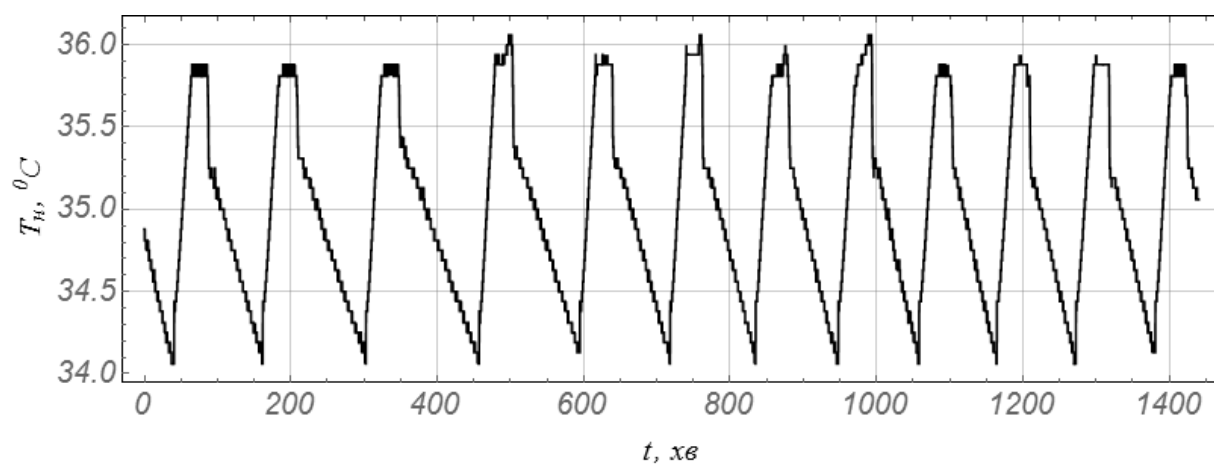


Рис. Д.10.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

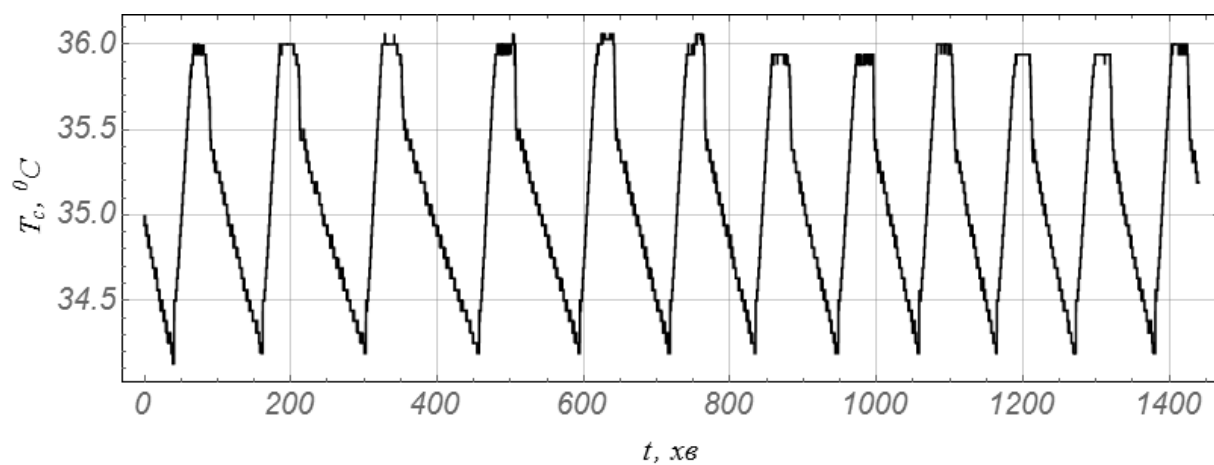


Рис. Д.10.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

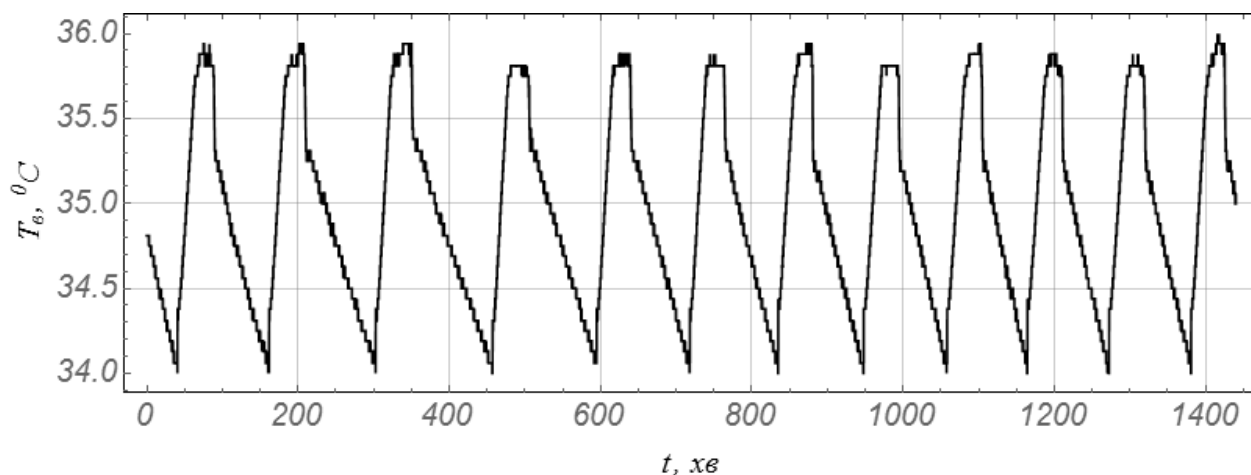


Рис. Д.10.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

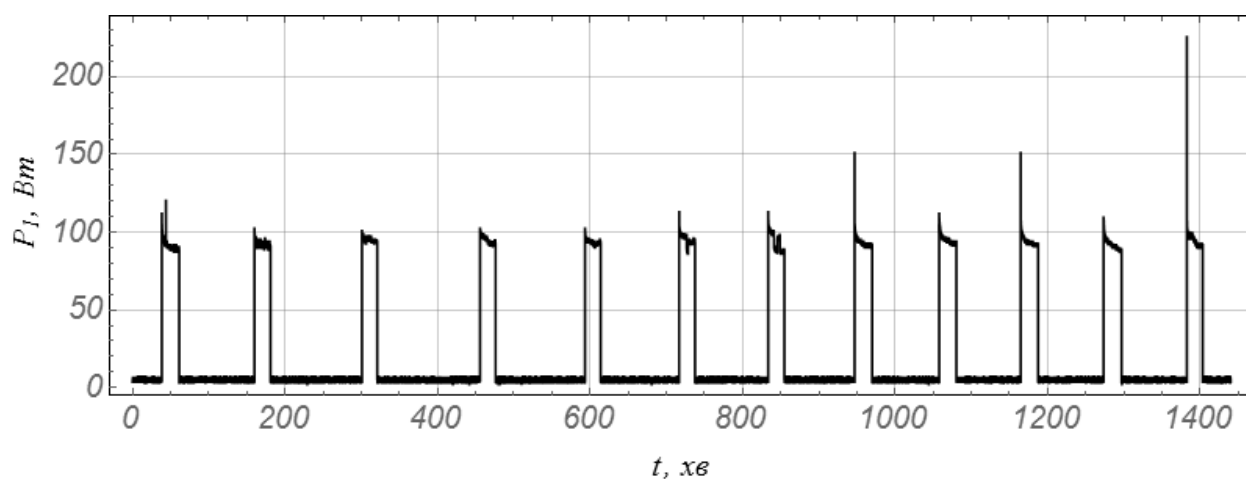


Рис. Д.10.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

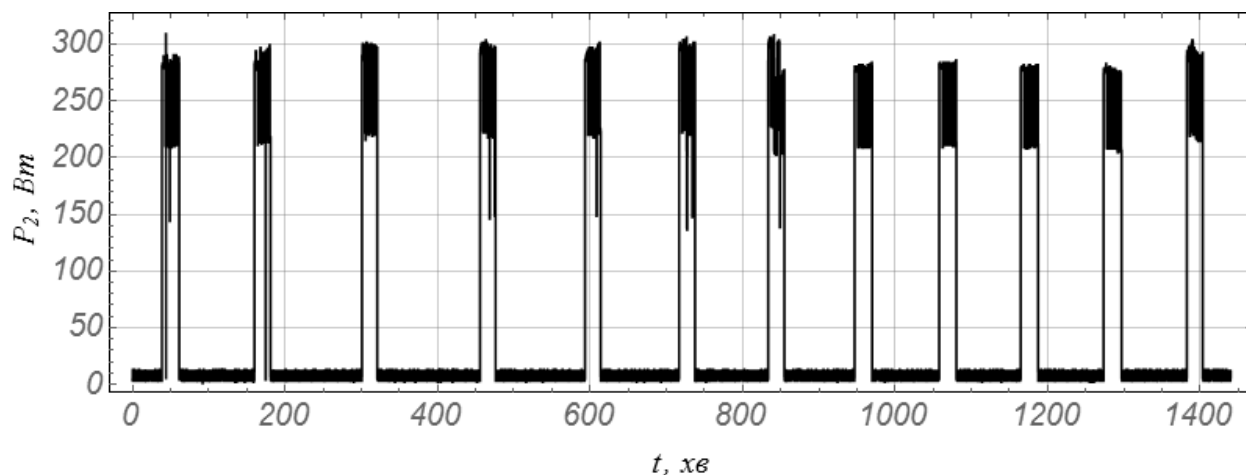


Рис. Д.10.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним у лопатях лопатевої мішалки

Д.11. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактору (6 доба)

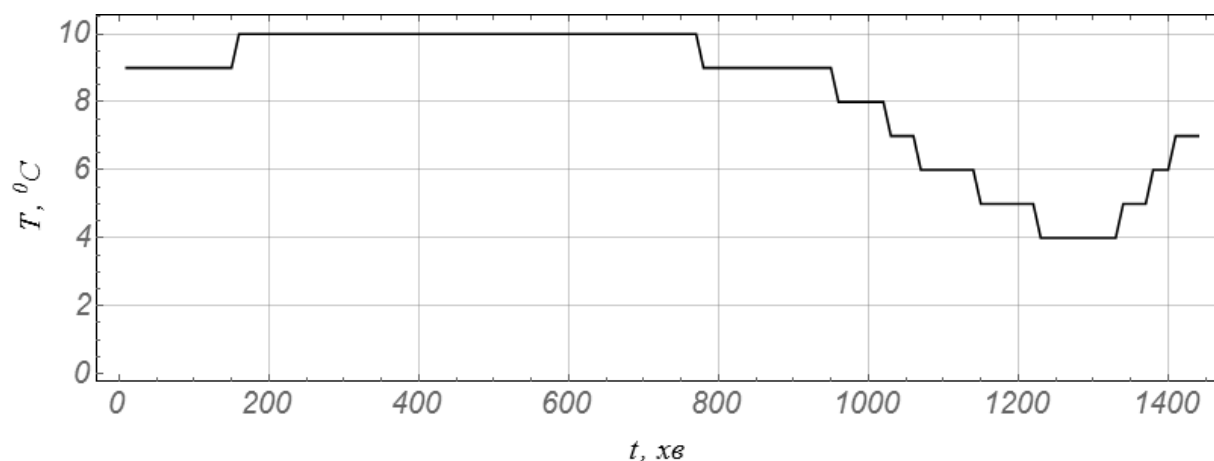


Рис. Д.11.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

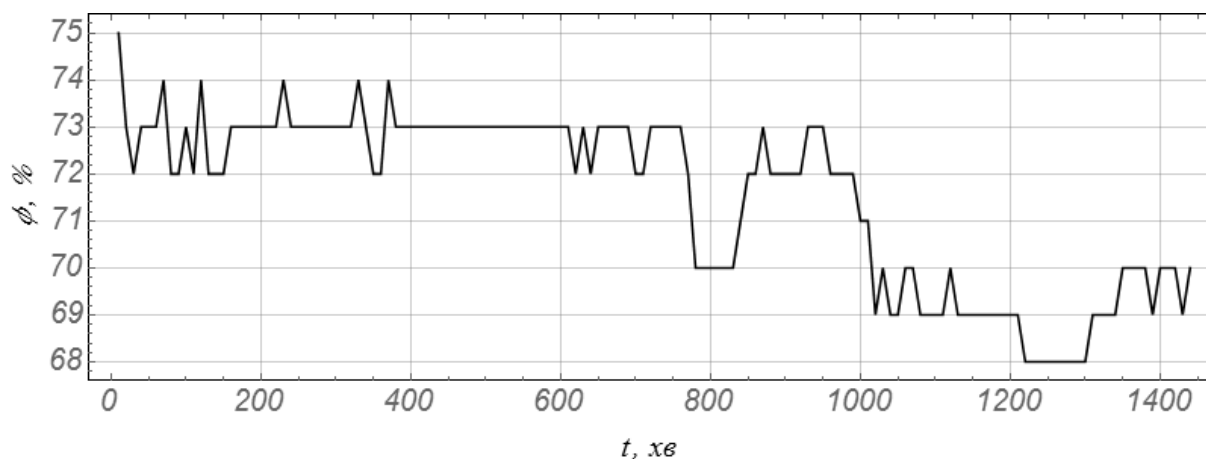


Рис. Д.11.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

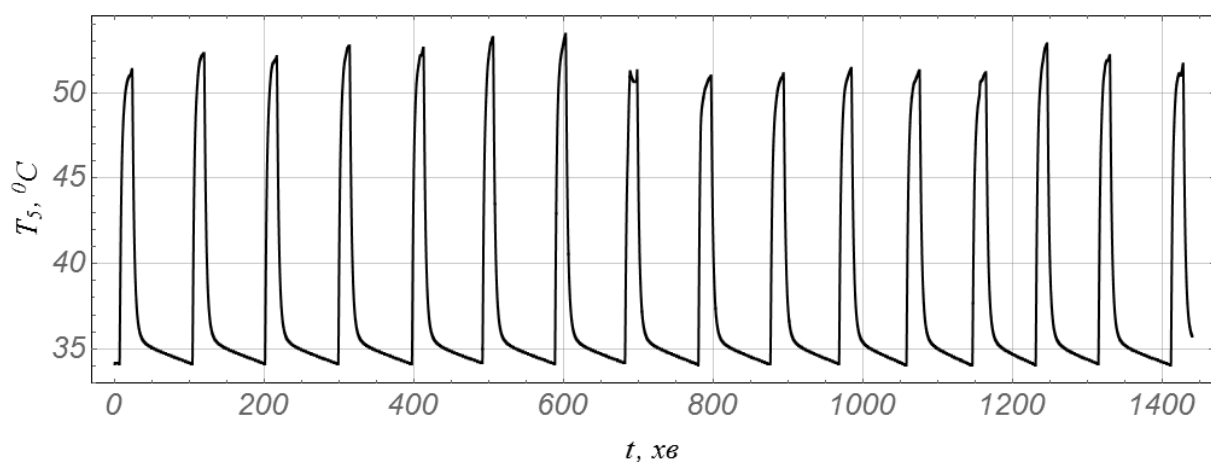


Рис. Д.11.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного на зовнішній стінці біогазового реактора

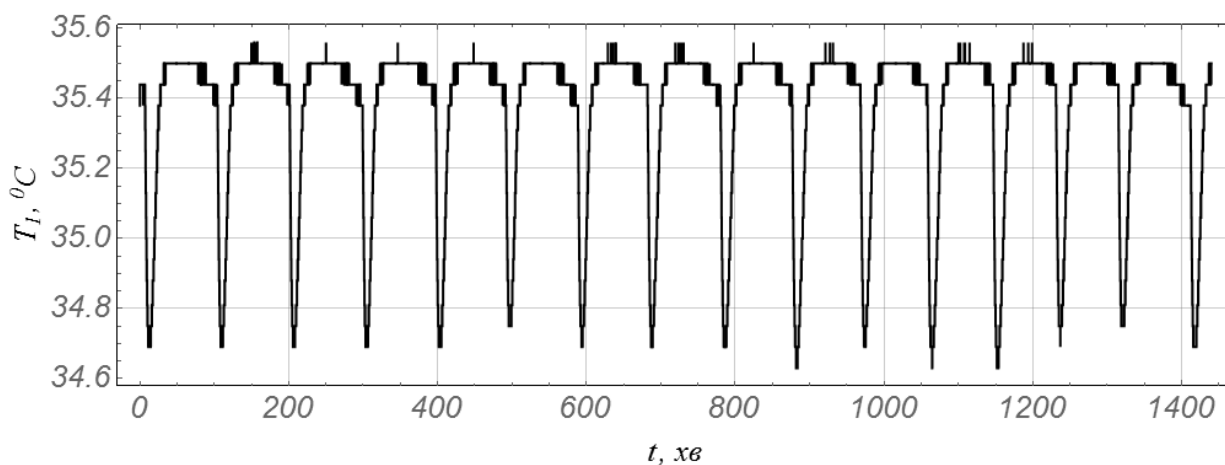


Рис. Д.11.4. Графік зміни температури першої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

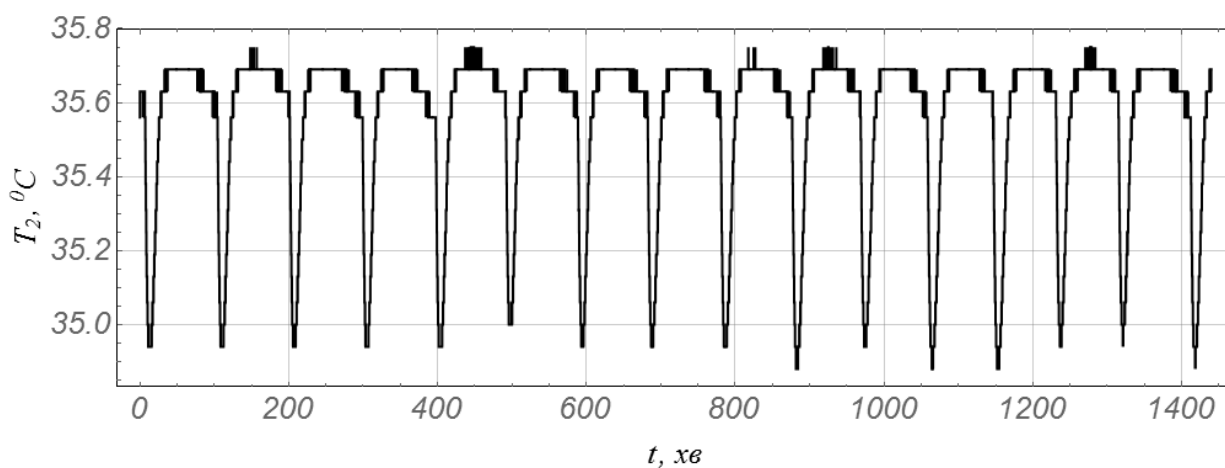


Рис. Д.11.5. Графік зміни температури другої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

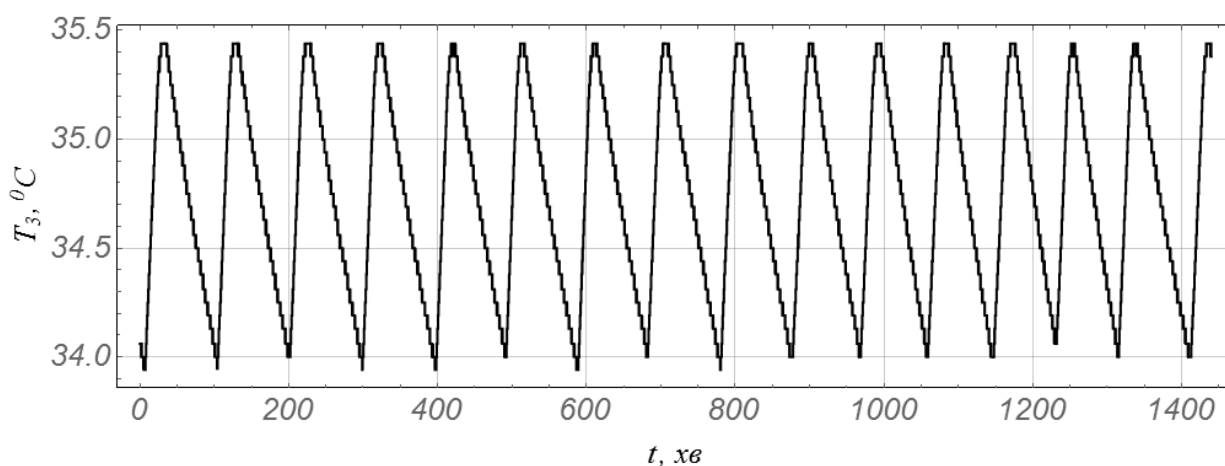


Рис. Д.11.6. Графік зміни температури першої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

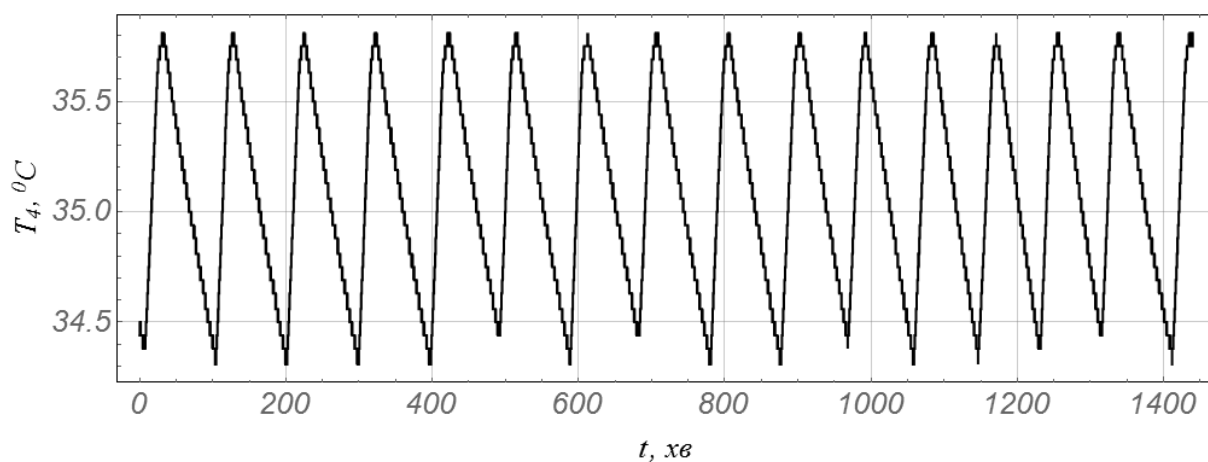


Рис. Д.11.7. Графік зміни температури другої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

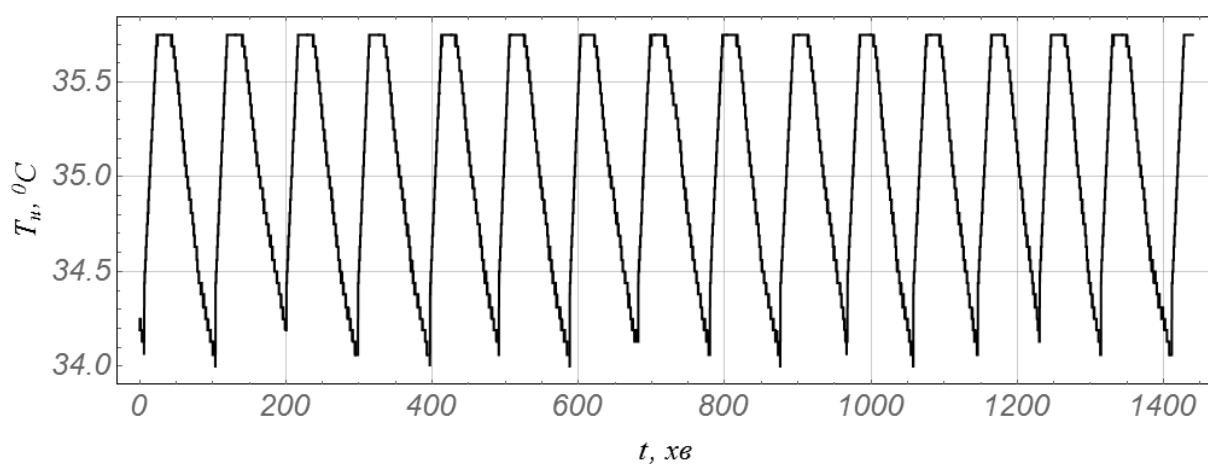


Рис. Д.11.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

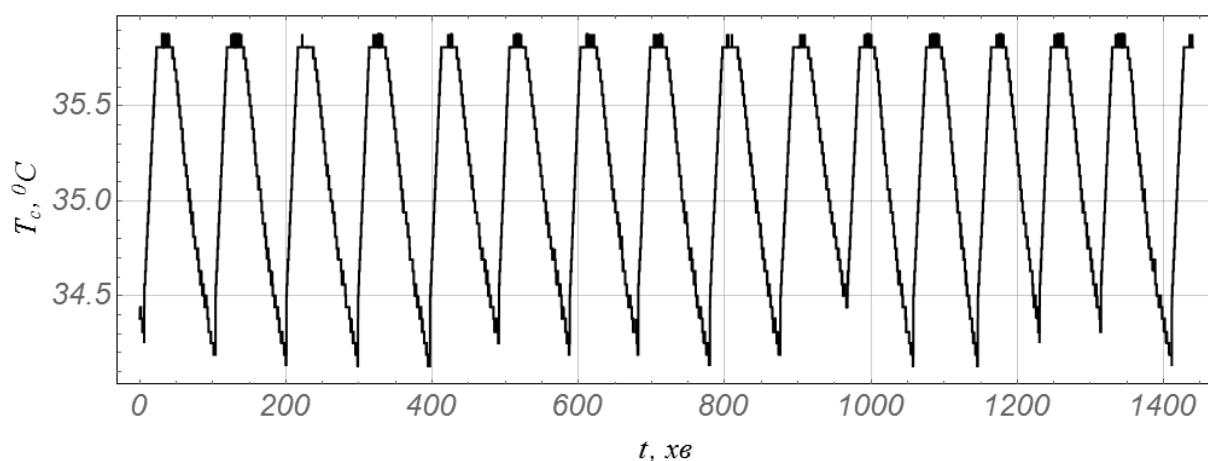


Рис. Д.11.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

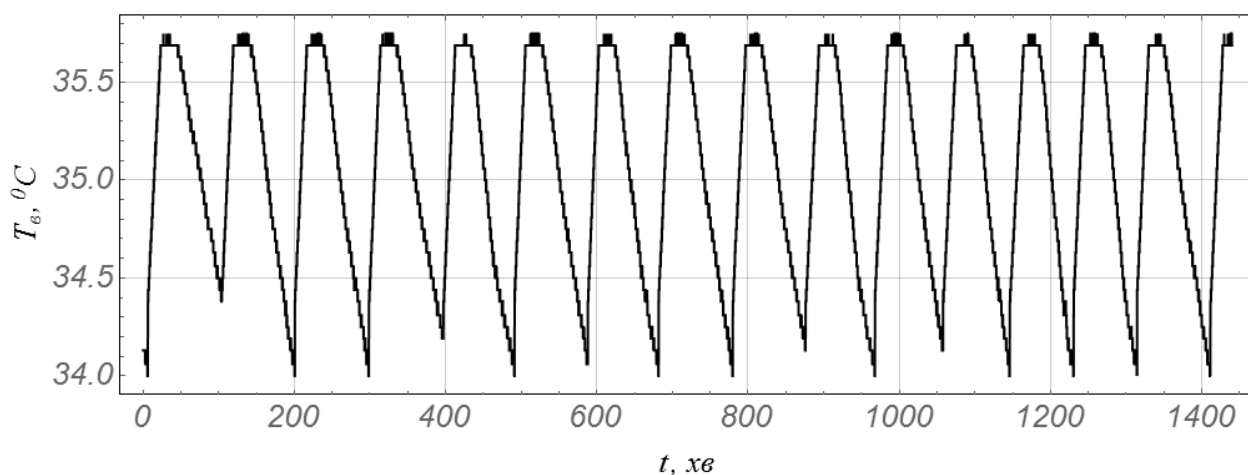


Рис. Д.11.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

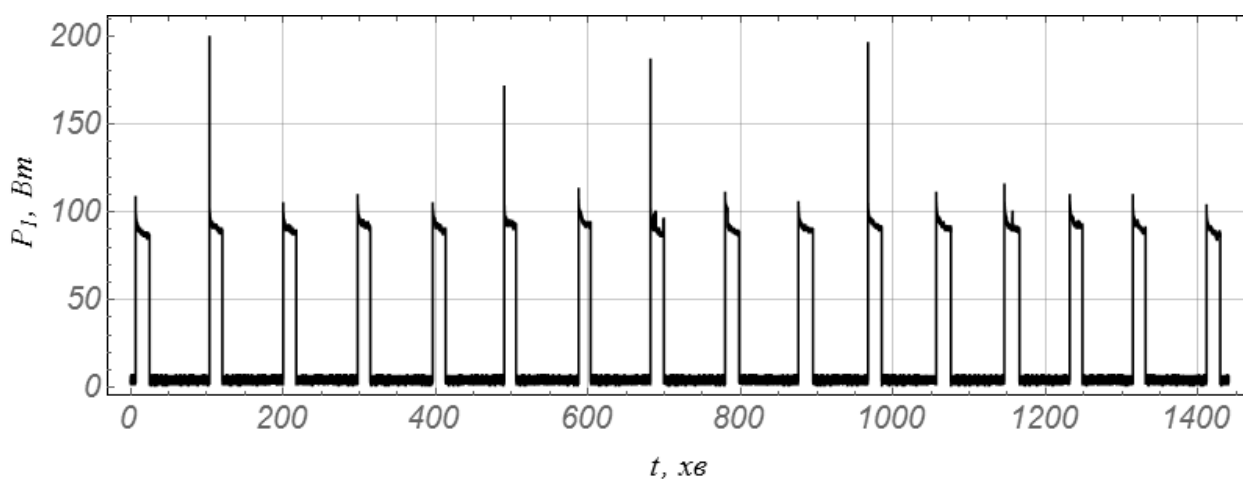


Рис. Д.11.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

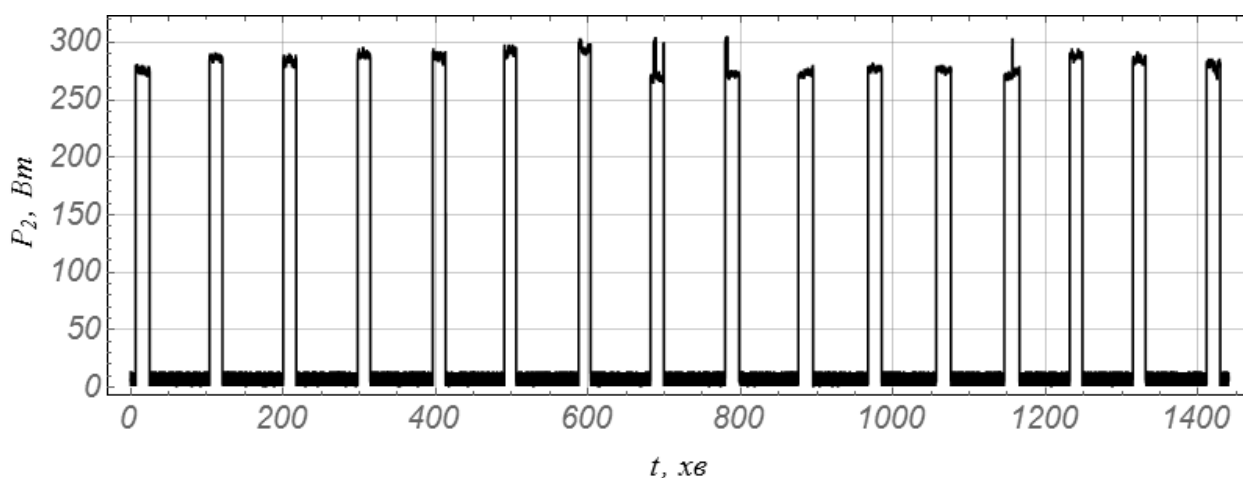


Рис. Д.11.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора

Д.12. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки (6 доба)

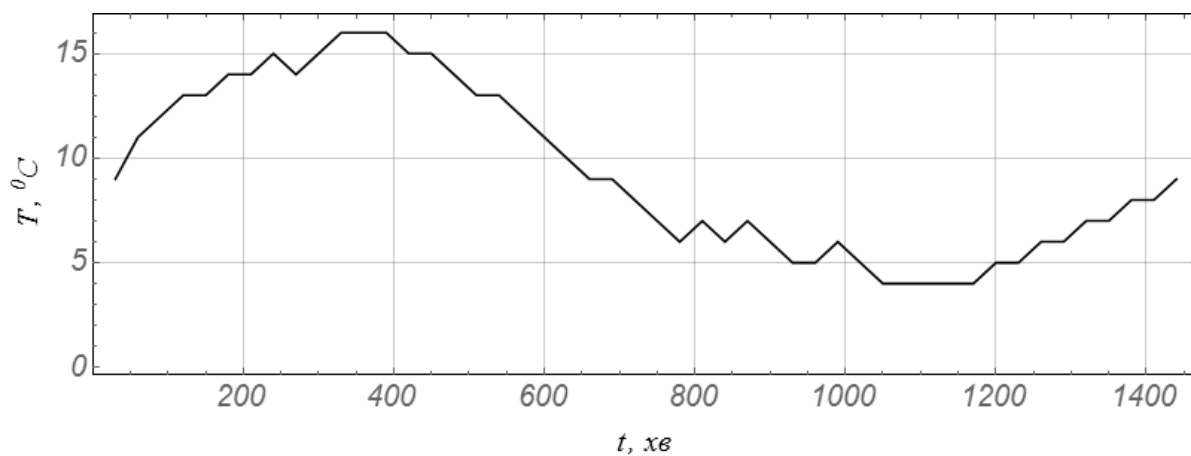


Рис. Д.12.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

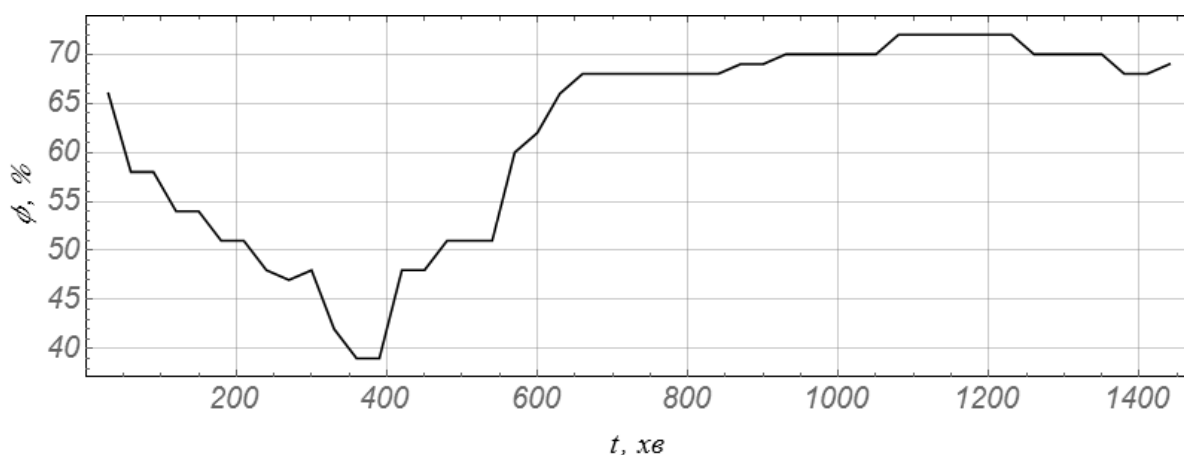


Рис. Д.12.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

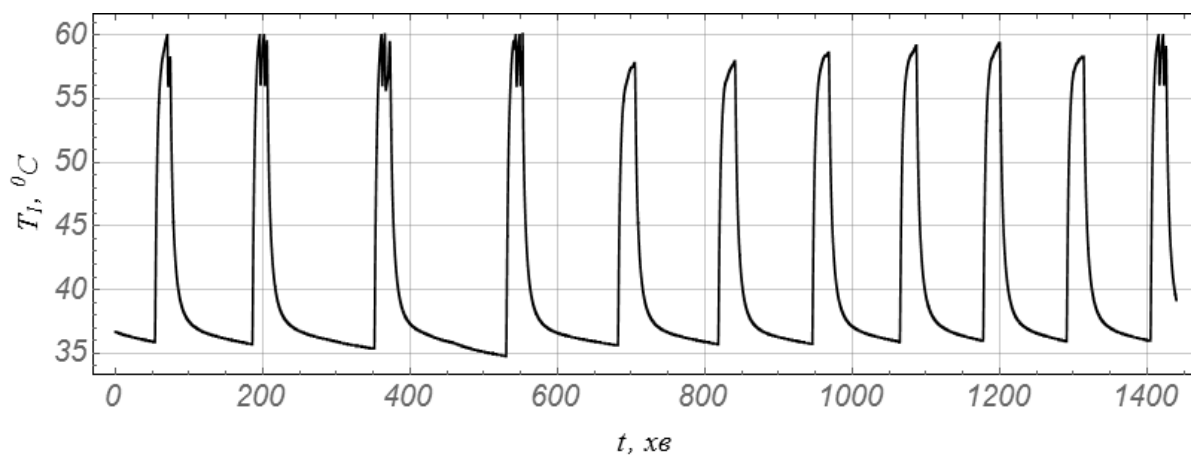


Рис. Д.12.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій нижній лопаті лопатевої мішалки

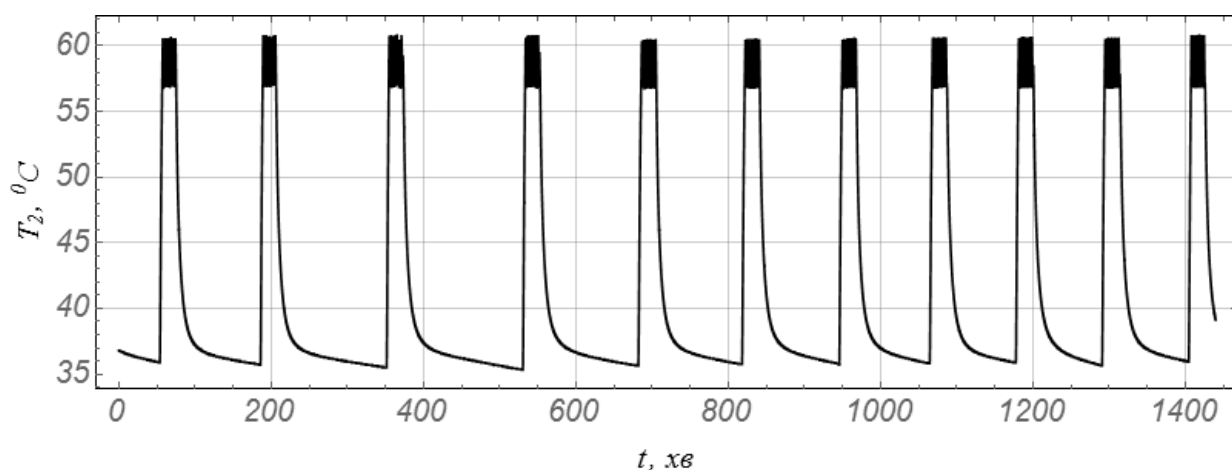


Рис. Д.12.4. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій нижній лопаті лопатевої мішалки

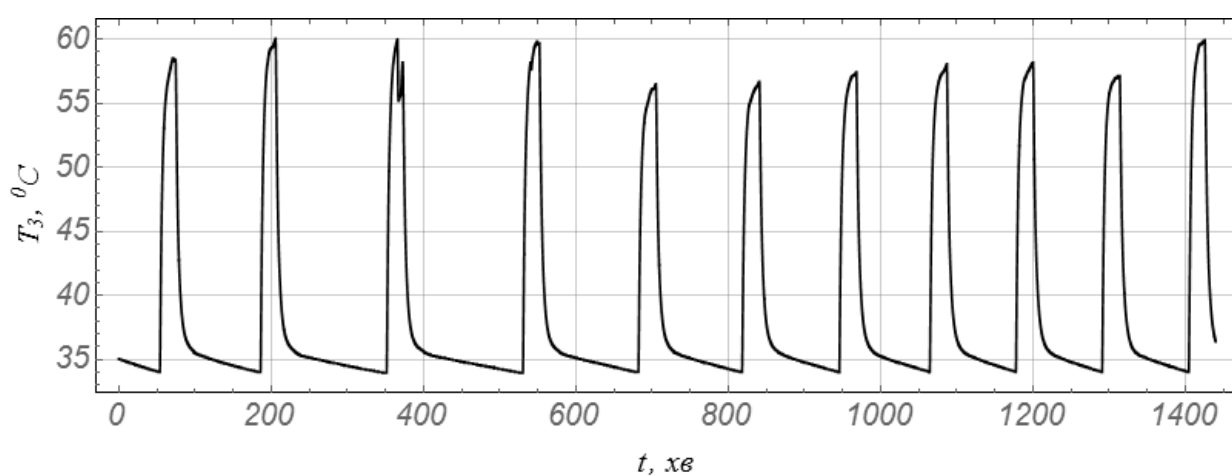


Рис. Д.12.5. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій верхній лопаті лопатевої мішалки

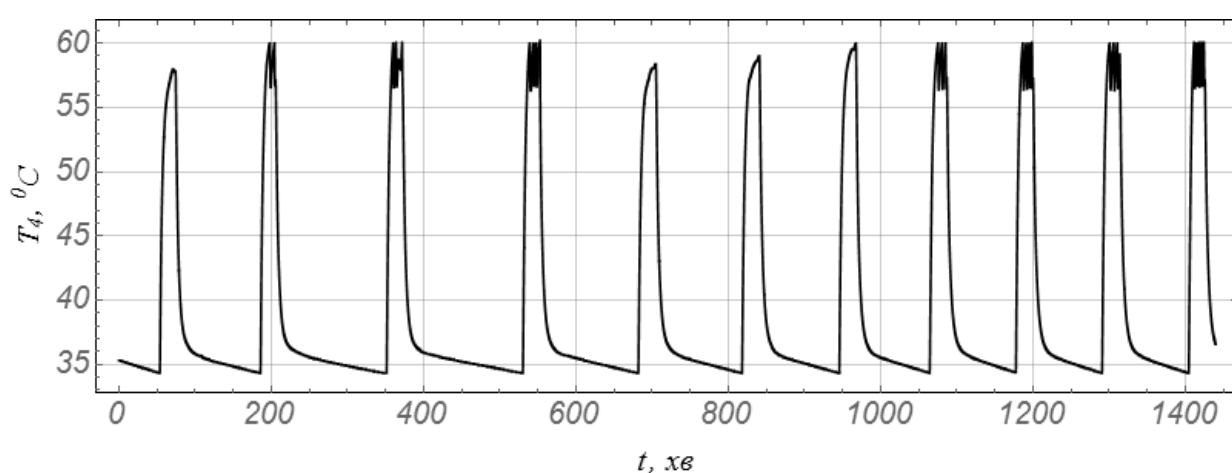


Рис. Д.12.6. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій верхній лопаті лопатевої мішалки

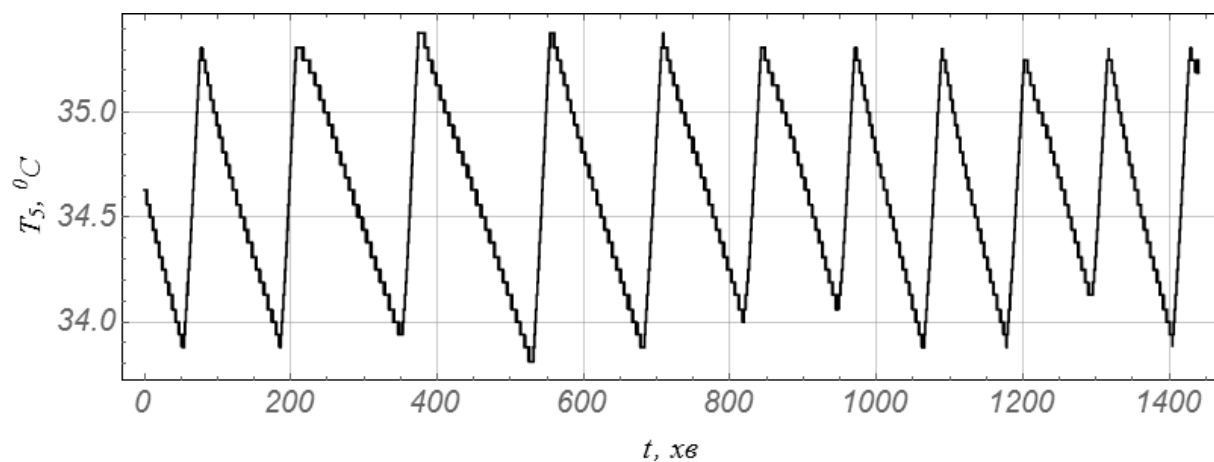


Рис. Д.12.7. Графік зміни температури стінки біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

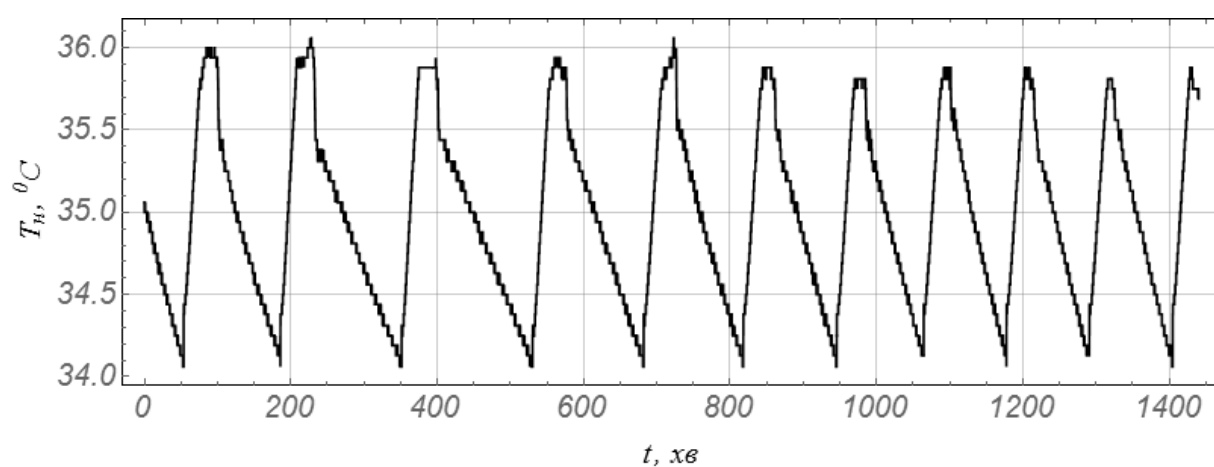


Рис. Д.12.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

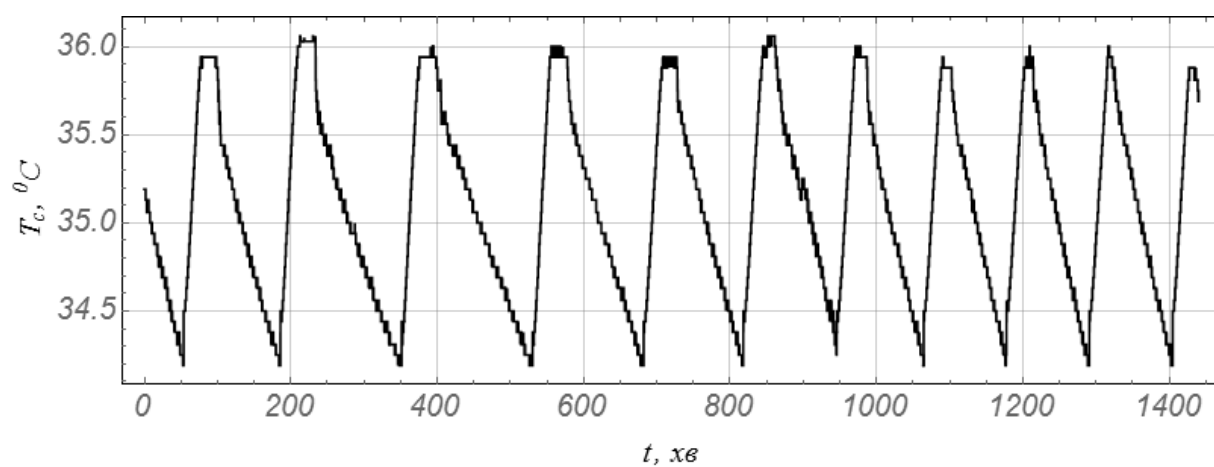


Рис. Д.12.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

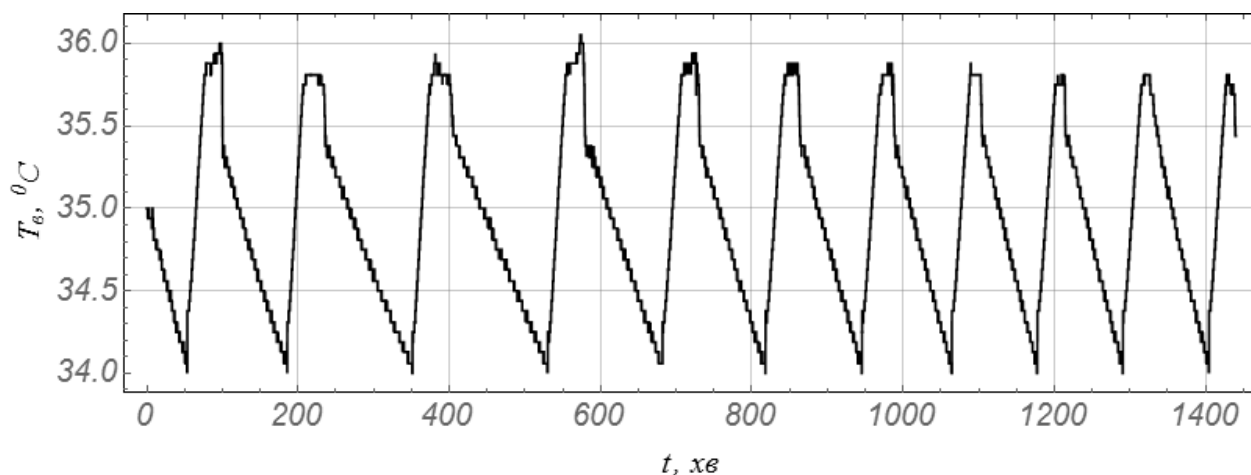


Рис. Д.12.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

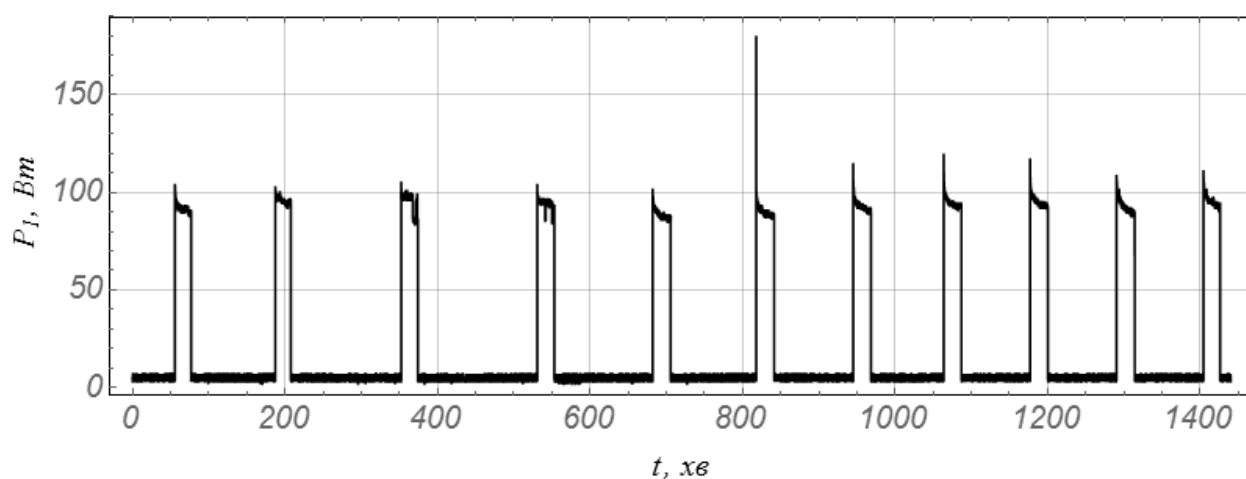


Рис. Д.12.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

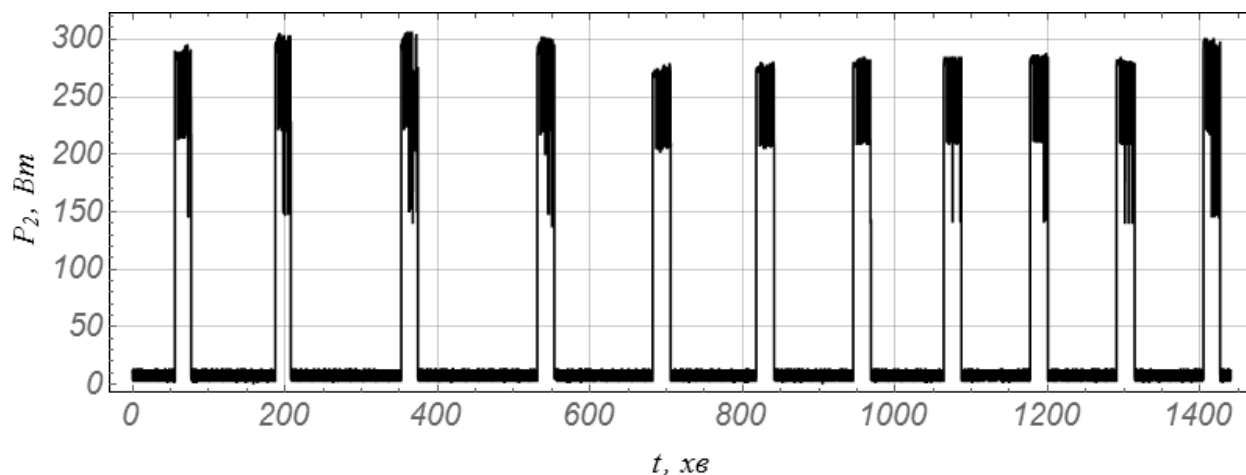


Рис. Г12.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним у лопатях лопатевої мішалки

Д.13. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю на стінці біогазового реактору (7 доба)

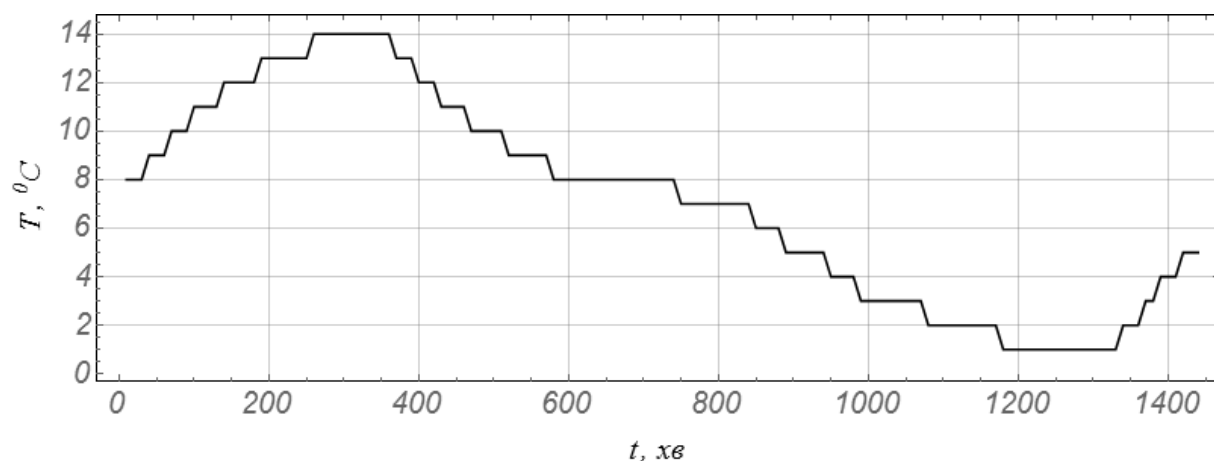


Рис. Д.13.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

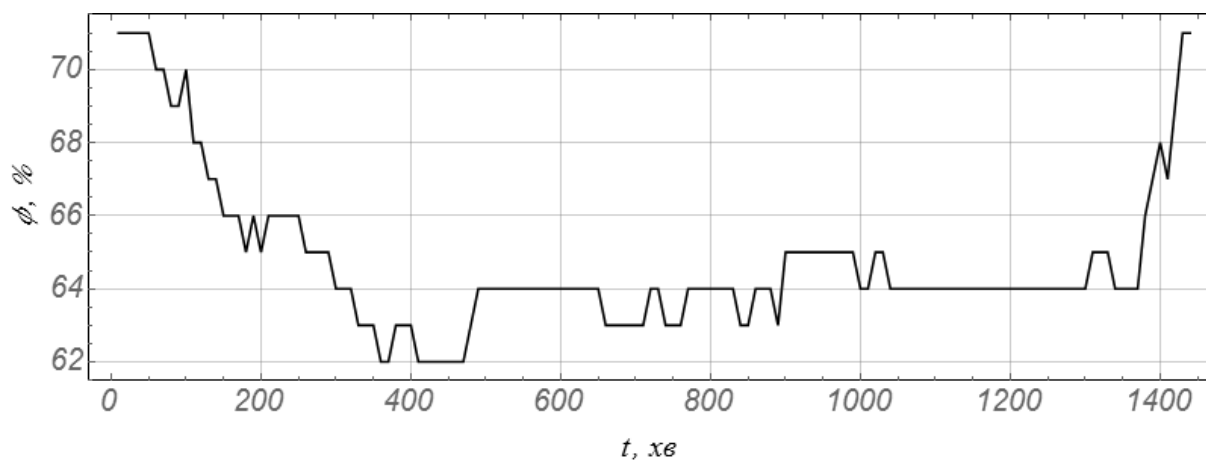


Рис. Д.13.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

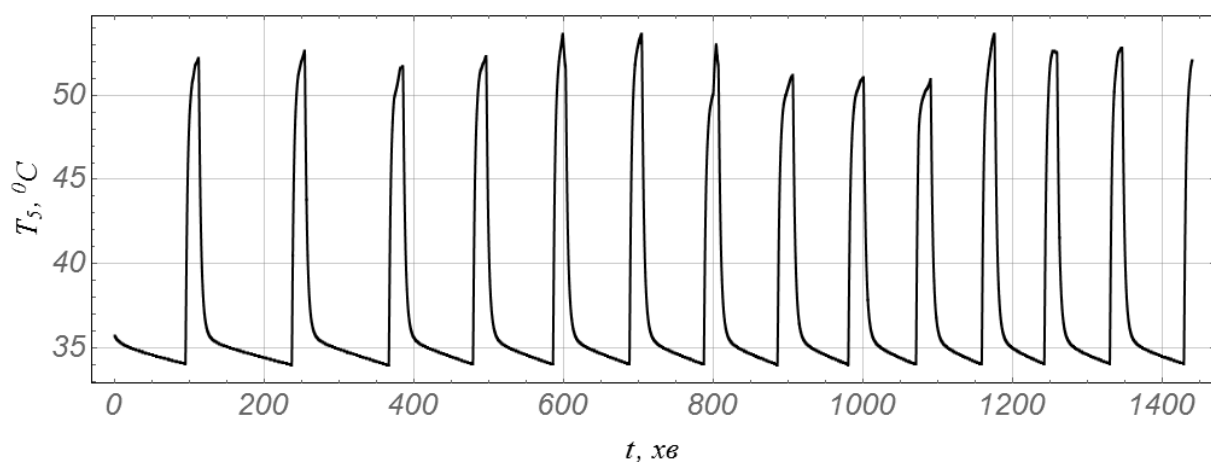


Рис. Д.13.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного на зовнішній стінці біогазового реактора

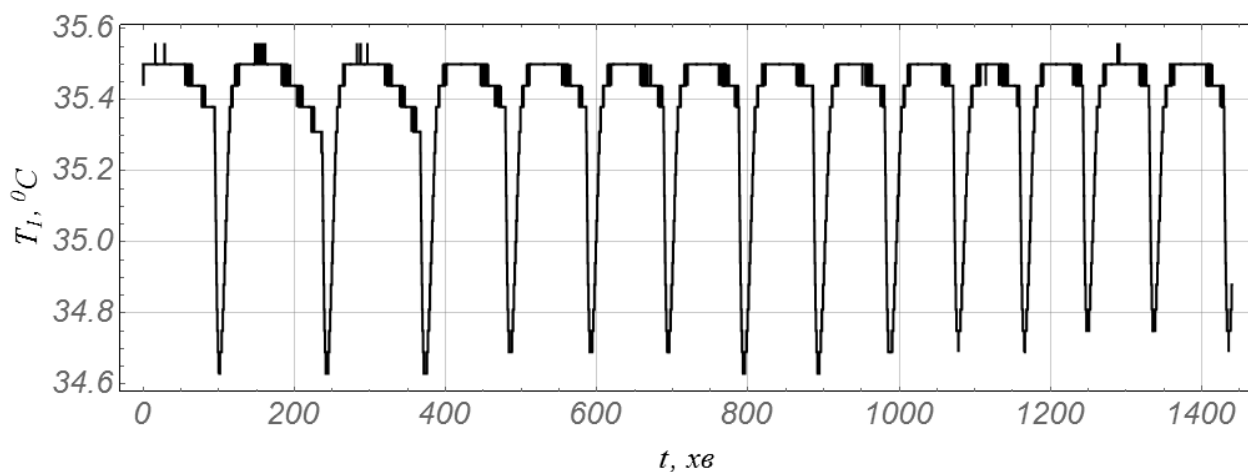


Рис. Д.13.4. Графік зміни температури першої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

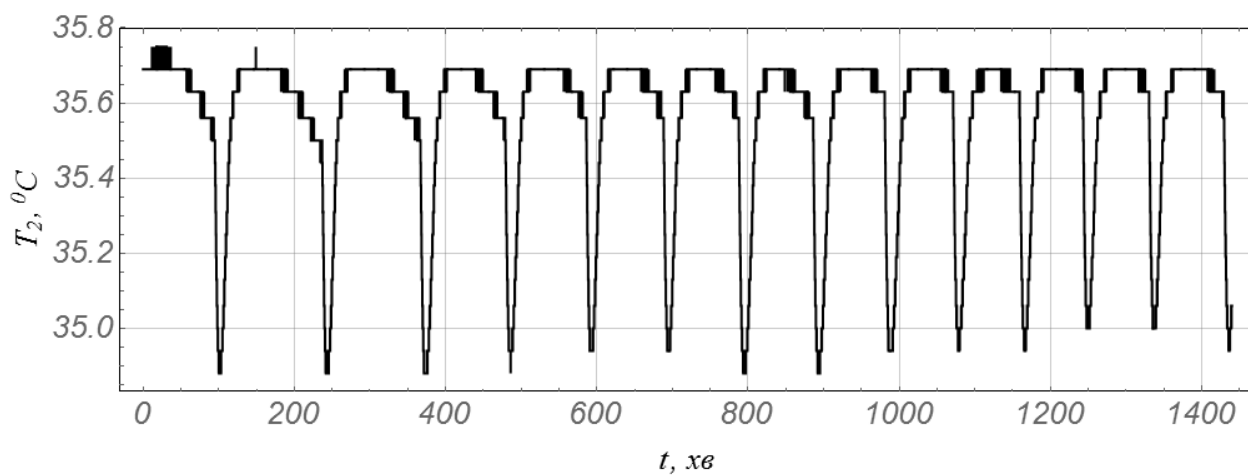


Рис. Д.13.5. Графік зміни температури другої нижньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

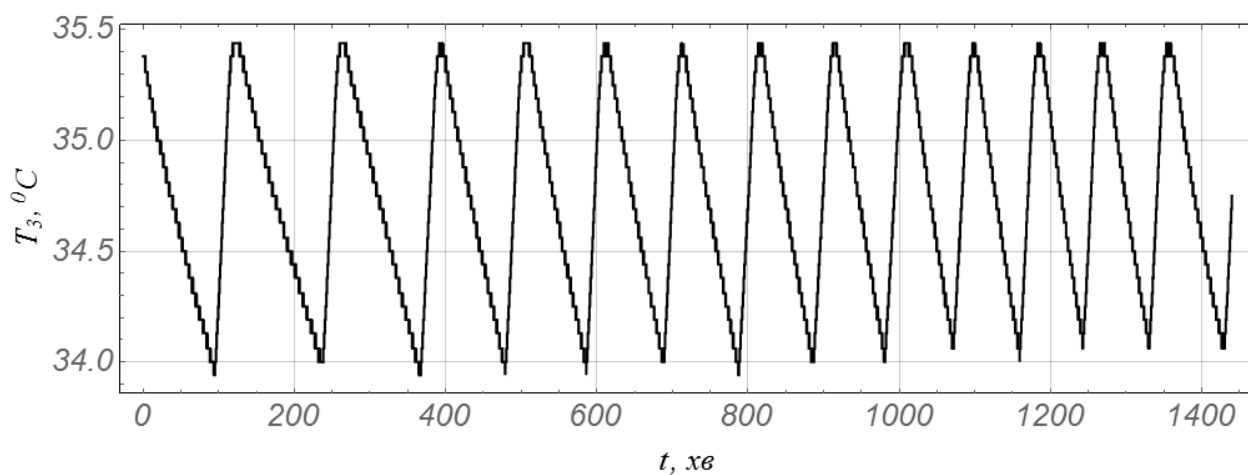


Рис. Д.13.6. Графік зміни температури першої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

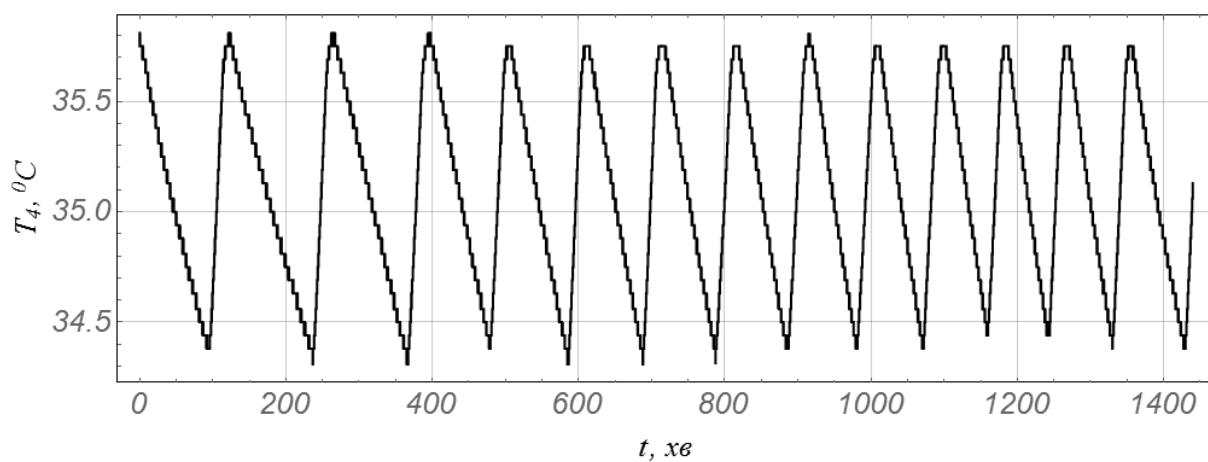


Рис. Д.13.7. Графік зміни температури другої верхньої лопаті лопатевої мішалки при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

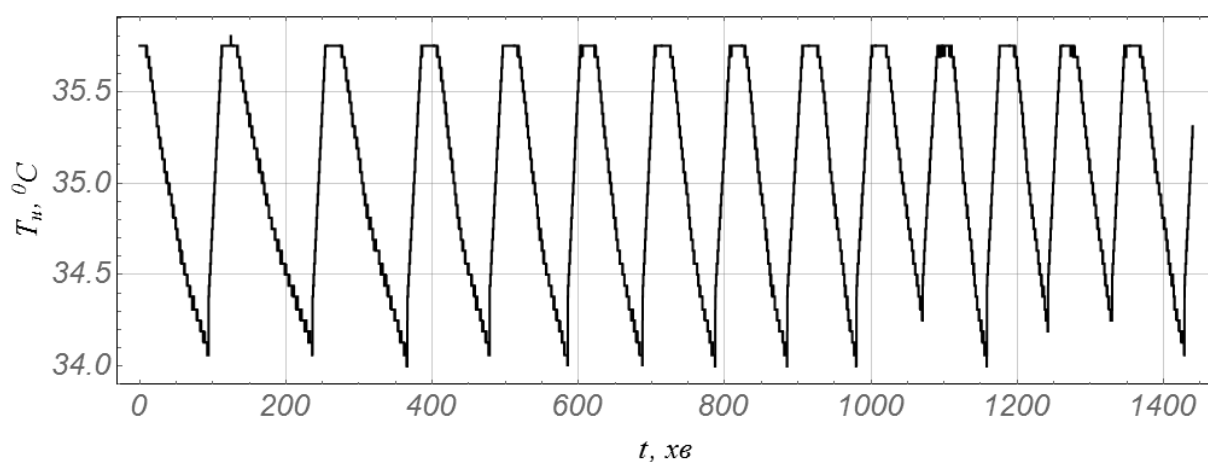


Рис. Д.13.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

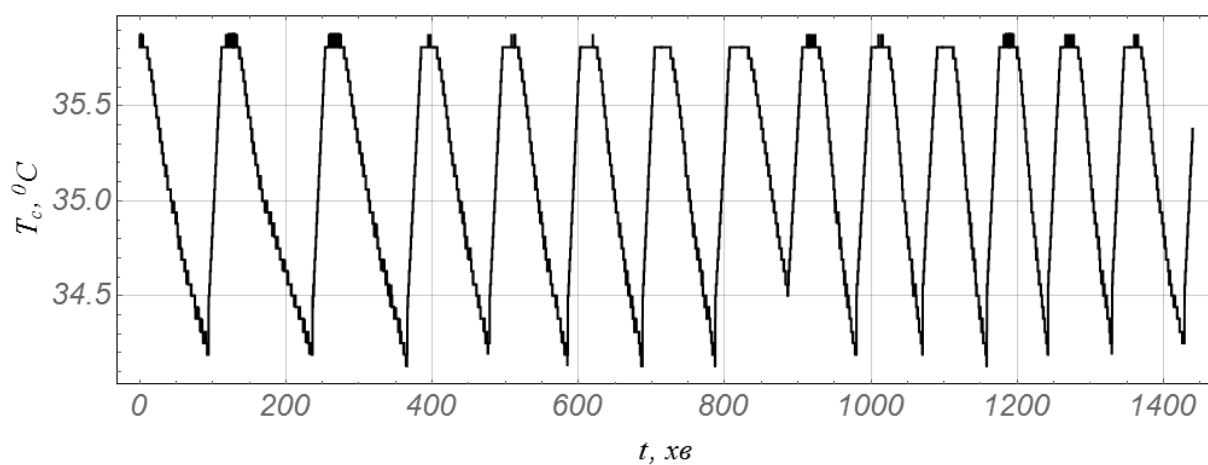


Рис. Д.13.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

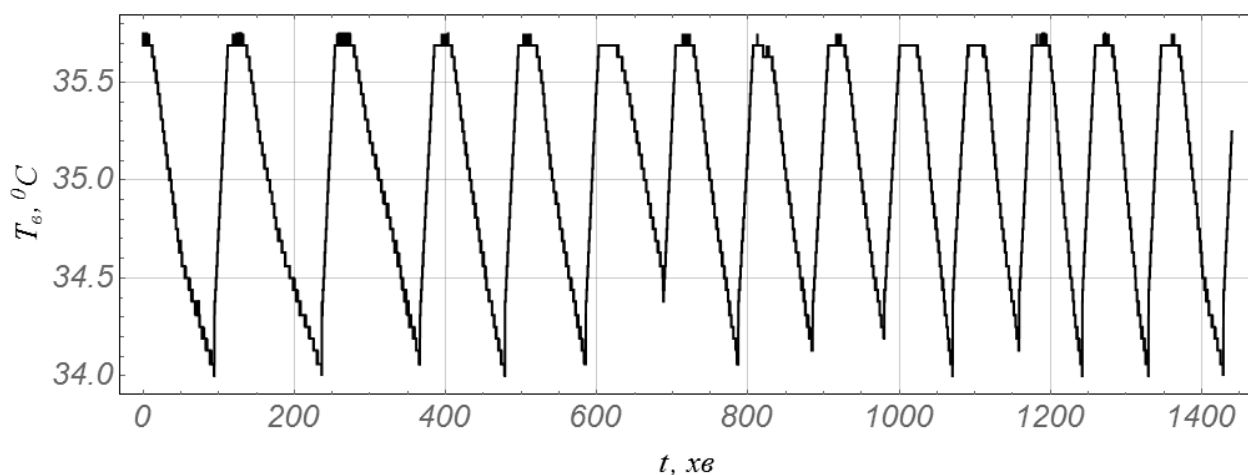


Рис. Д.13.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

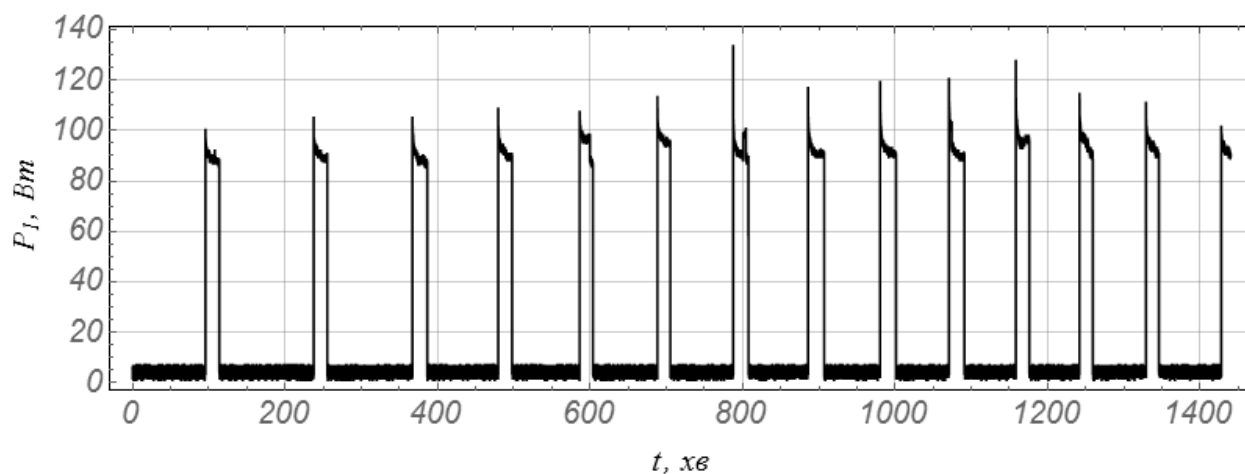


Рис. Д.13.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача на зовнішній стінці біогазового реактора

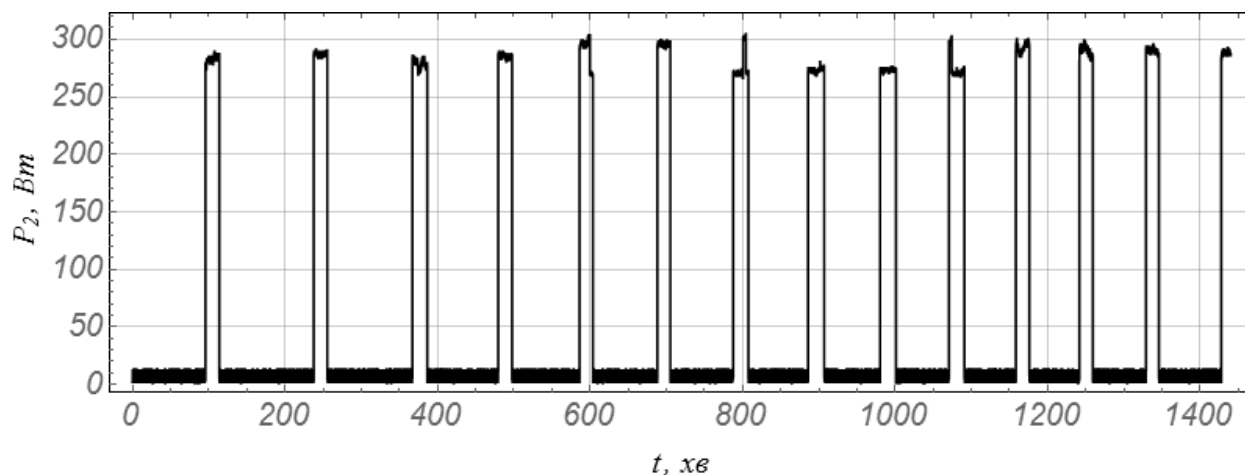


Рис. Д.13.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним на зовнішній стінці біогазового реактора

Д.14. Результати експериментальних досліджень при розміщенні електричного нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки (7 доба)

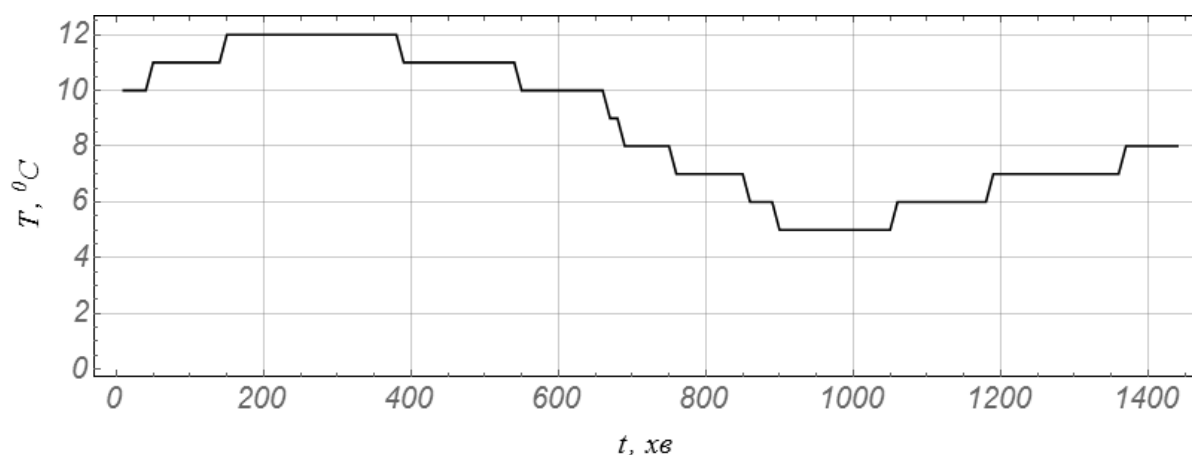


Рис. Д.14.1. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

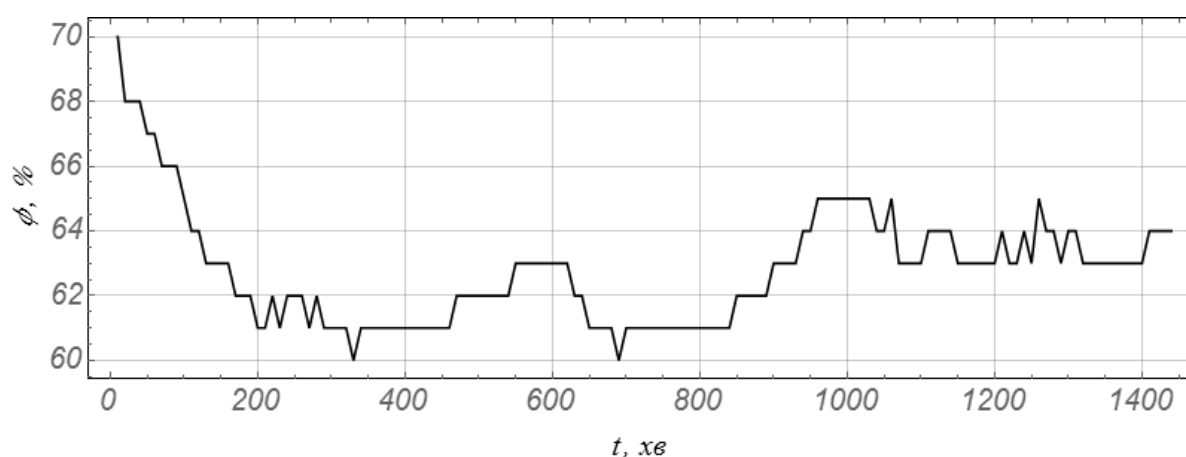


Рис. Д.14.2. Графік зміни вологості навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

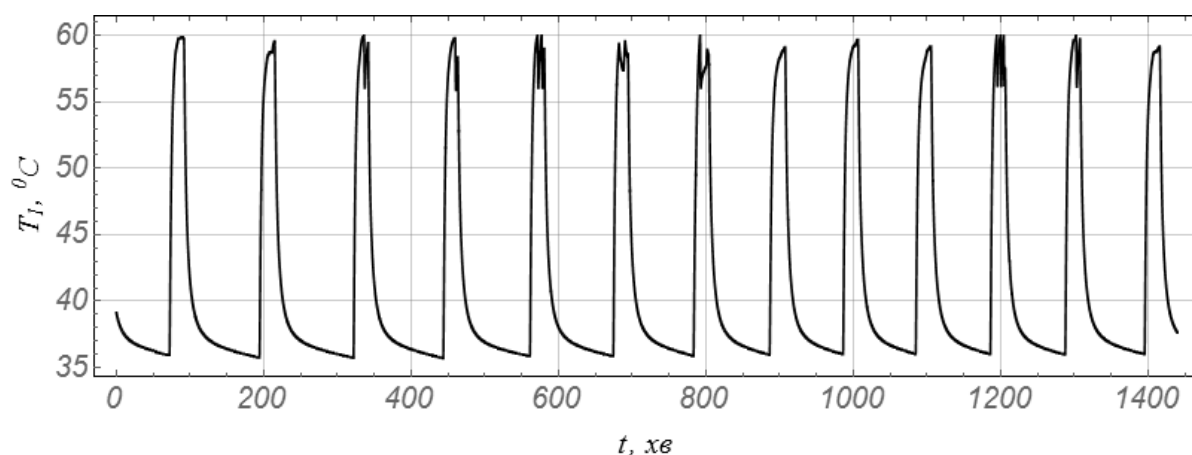


Рис. Д.14.3. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій нижній лопаті лопатевої мішалки

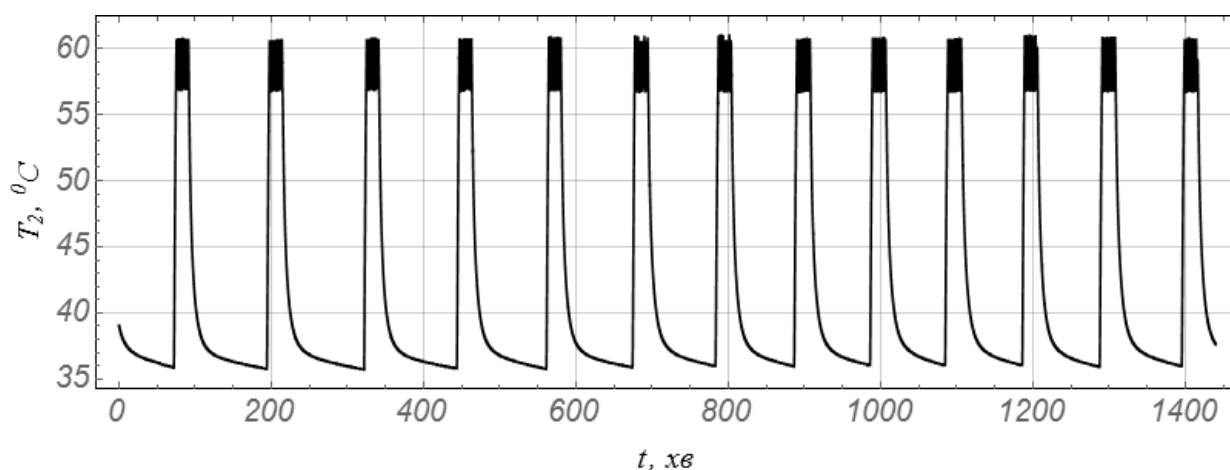


Рис. Д.14.4. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій нижній лопаті лопатевої мішалки

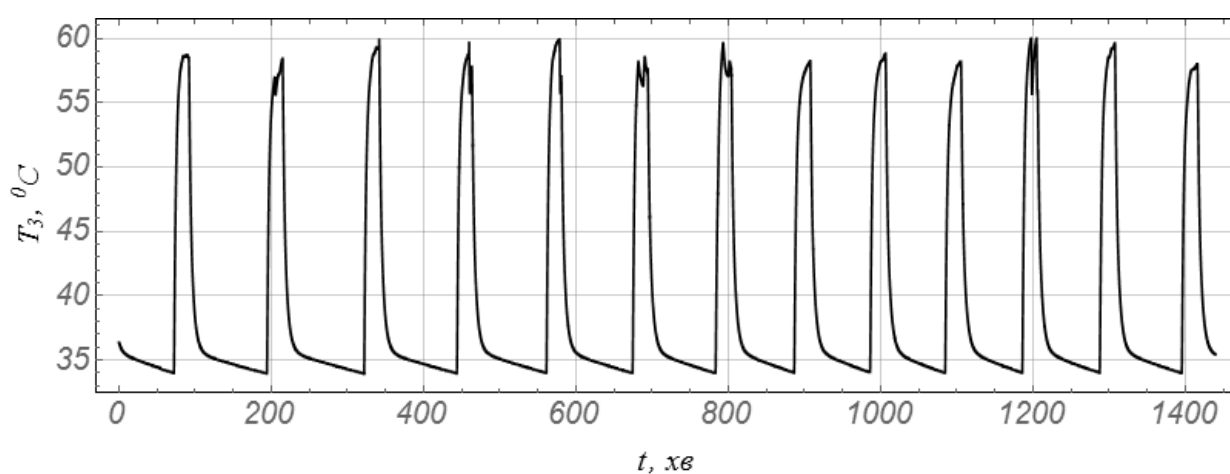


Рис. Д.14.5. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у першій верхній лопаті лопатевої мішалки

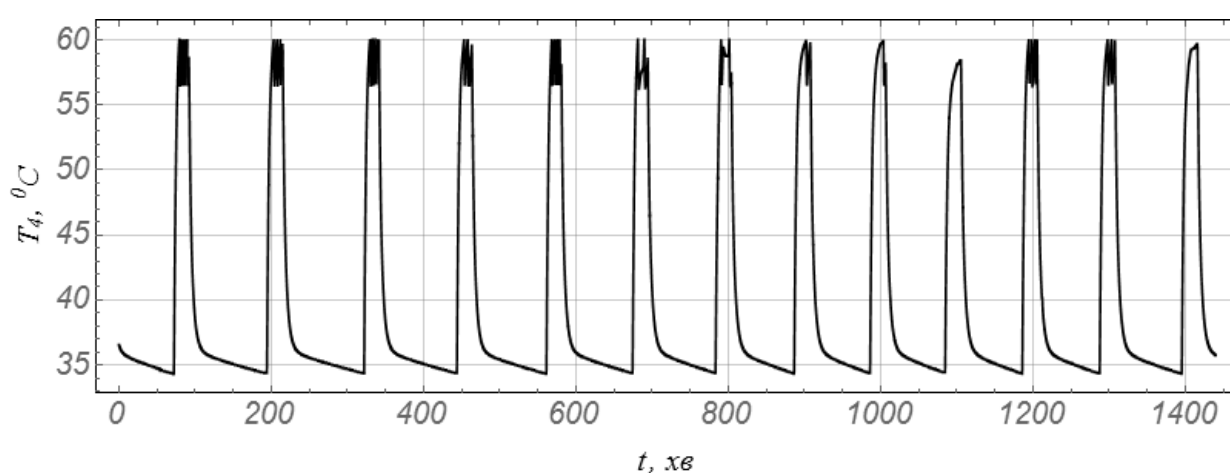


Рис. Д.14.6. Графік зміни температури електричного нагрівача розміщеного у другій верхній лопаті лопатевої мішалки

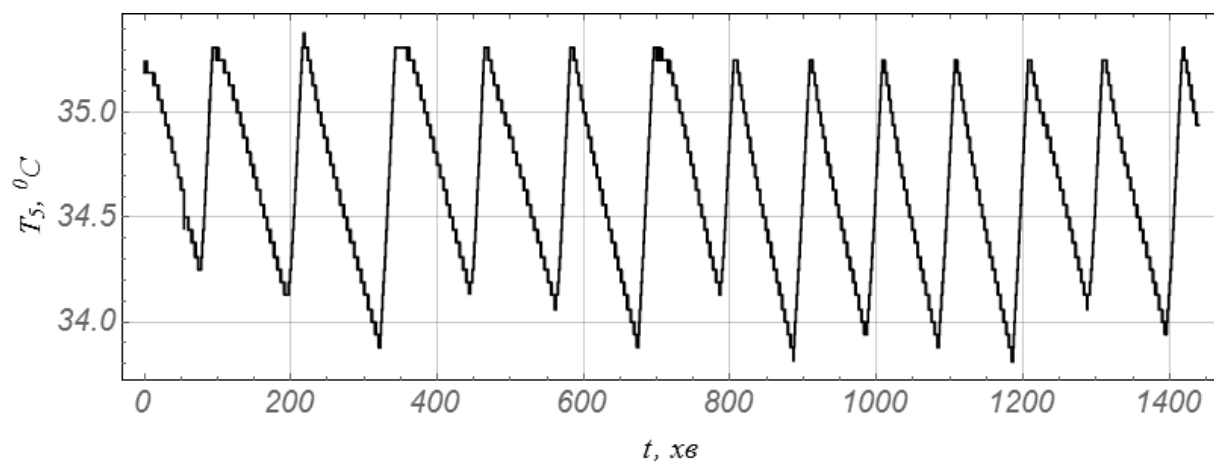


Рис. Д.14.7. Графік зміни температури стінки біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

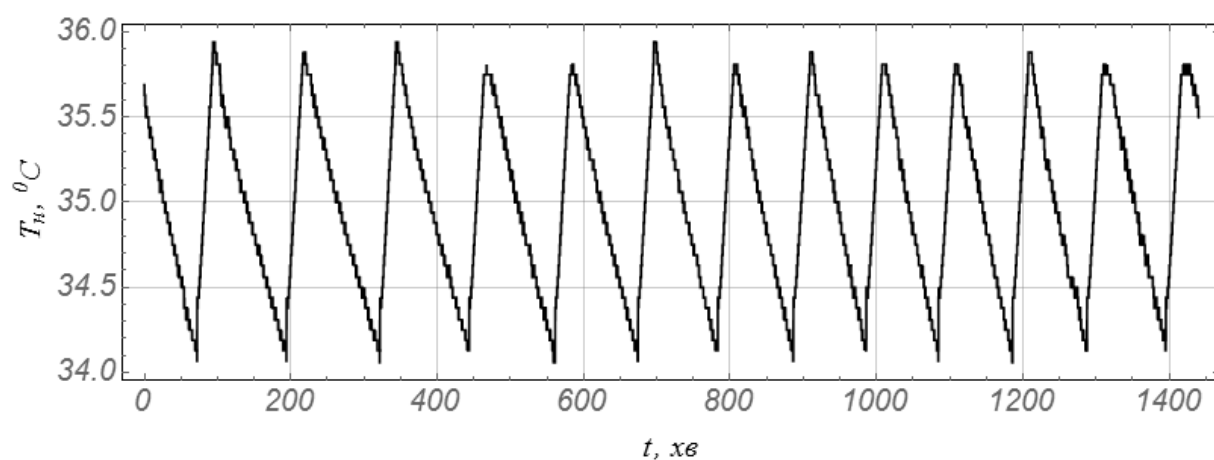


Рис. Д.14.8. Графік зміни середньої температури субстрату у нижній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

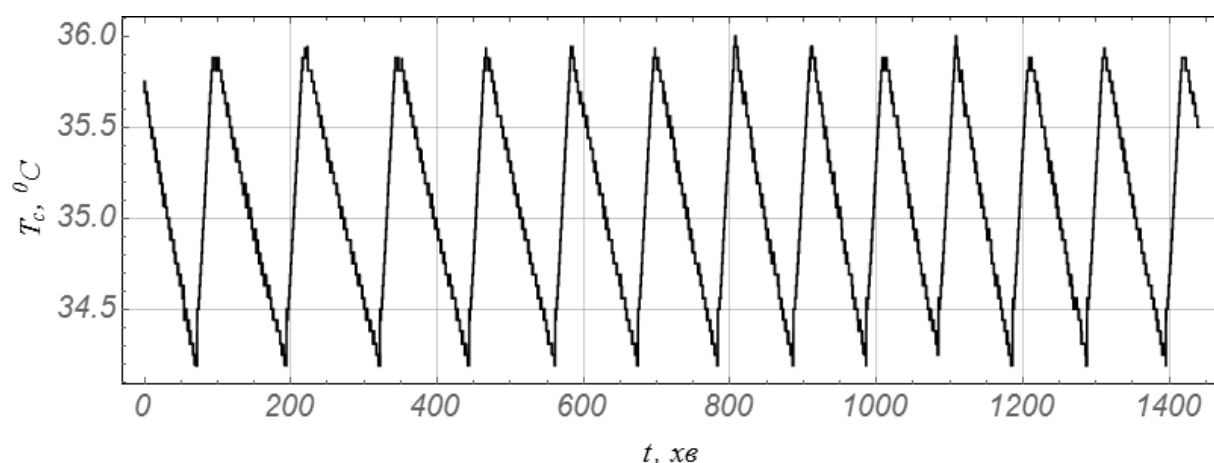


Рис. Д.14.9. Графік зміни середньої температури субстрату у середній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

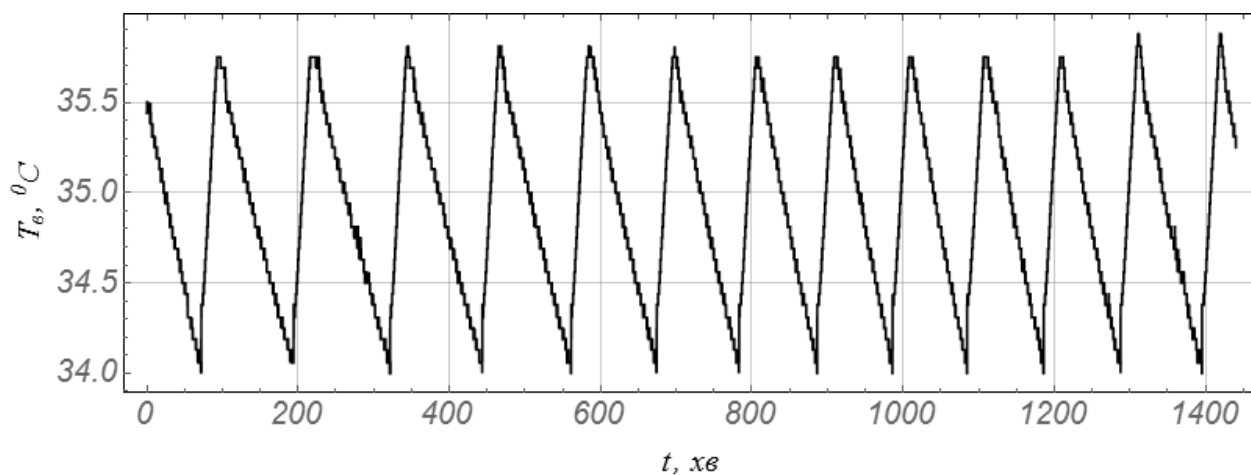


Рис. Д.14.10. Графік зміни середньої температури субстрату у верхній частині біогазового реактора при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

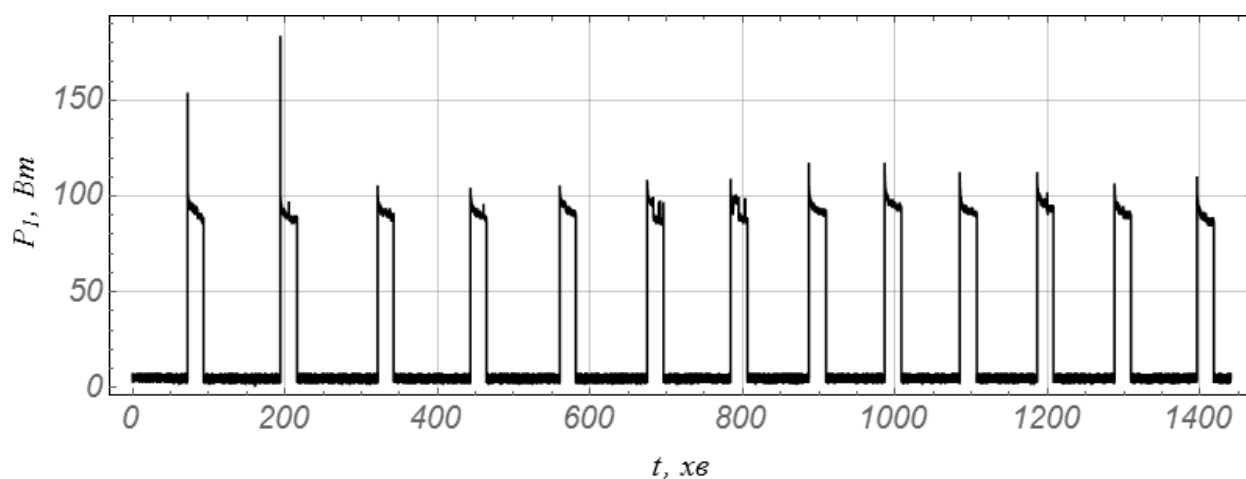


Рис. Д.14.11. Графік споживаної потужності однофазним електричним двигуном при розміщенні електричного нагрівача у лопатях лопатевої мішалки

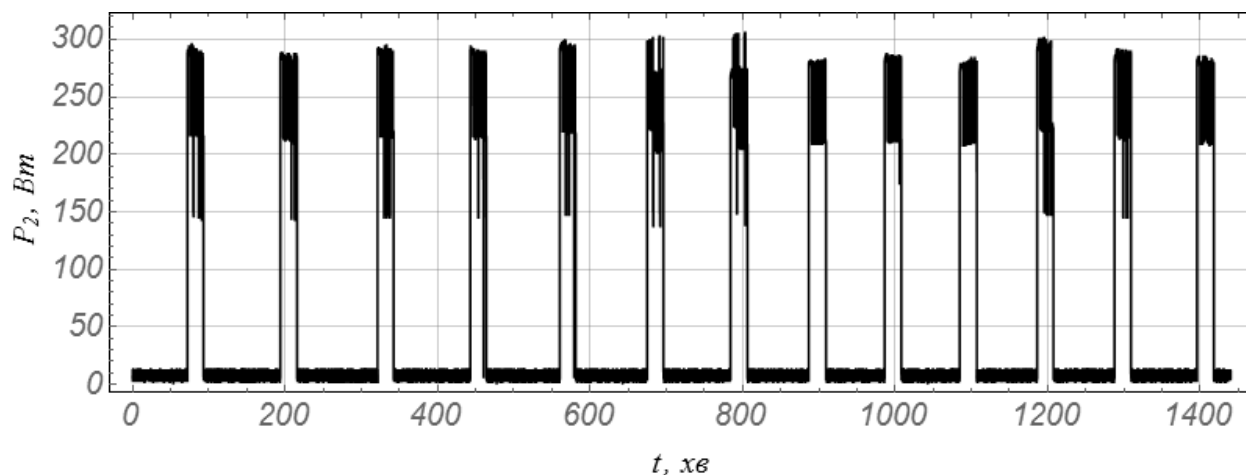


Рис. Д.14.12. Графік споживаної потужності електричним нагрівачем розміщеним у лопатях лопатевої мішалки

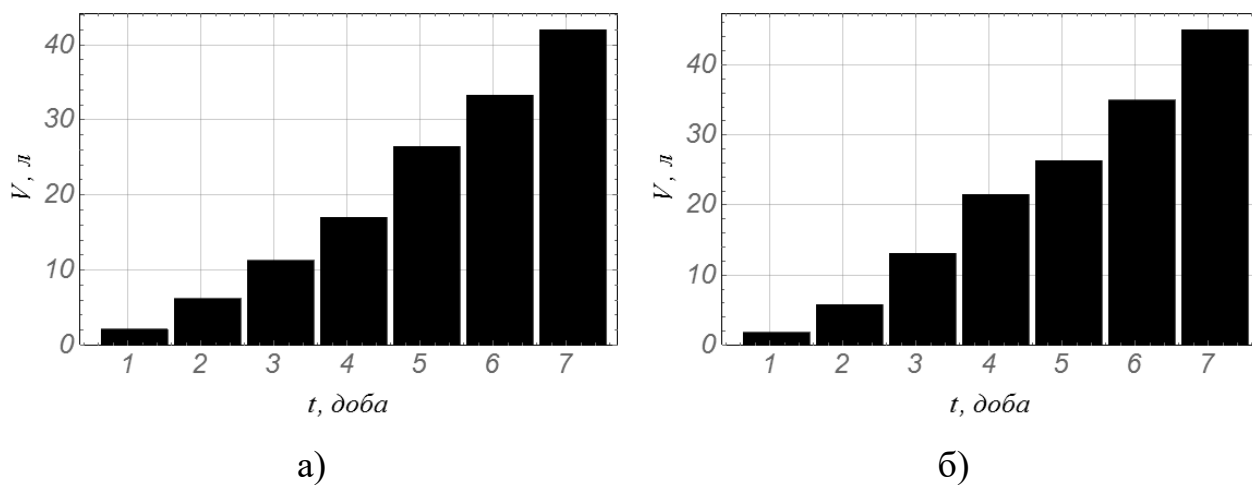
Д.15. Вироблений об'єм біогазу за час експериментальних досліджень

Рис. Д.15.1. Вироблений об'єм біогазу за час експериментальних досліджень:
а) для «класичної» системи електричного підігріву на стінці біогазового реактора;
б) для «раціональної» системи електричного підігріву вмонтованого у лопаті двоярусної лопатевої мішалки (електротепломеханічна система).

ДОДАТОК Е



(11) **126250**(19) **UA**(51) МПК
C02F 11/04 (2006.01)
C02F 3/28 (2006.01)(21) Номер заявки: **а 2020 04191**(22) Дата подання заявки: **08.07.2020**(24) Дата, з якої є чинними
права інтелектуальної
власності: **08.09.2022**(41) Дата публікації відомостей
про заявку та номер
Бюлетеня: **26.10.2020,**
Бюл.№ 20(46) Дата публікації відомостей
про державну реєстрацію
та номер Бюлетеня: **07.09.2022,**
Бюл. № 36

(72) Винахідники:

Заблудський Микола
Миколайович, UA,
Сподоба Михайло
Олексійович, UA,
Сподоба Олександр
Олексійович, UA

(73) Володілець:

НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
УКРАЇНИ,
вул. Героїв Оборони, 15, м.
Київ-41, 03041, UA

(54) Назва винаходу:

БІОГАЗОВИЙ РЕАКТОР

(57) Формула винаходу:

Біогазовий реактор, який містить резервуар, штуцер відведення біогазу, встановлені на валу підігрівач біомаси і лопатевий перемішувач, який **відрізняється** тим, що вал виконано порожнистим, лопатевий перемішувач виконано у вигляді лопатей з внутрішніми порожнистими каналами зигзагоподібної форми, підігрівач біомаси виконано у вигляді гнучкого електричного нагрівального елемента, що має секційно з'єднані між собою прямолинійні і зигзагоподібні ділянки, які розташовані відповідно у порожнистому валу і лопатях лопатевого перемішувача, і приєднаного до джерела постійного або змінного електричного струму живлення через вибухобезпечні ковзні контакти, при цьому лопаті лопатевого перемішувача розташовані під кутом, який знаходиться у межах від 30° до 60°, до осі порожнистого вала і для монтажу гнучкого електричного нагрівача лопаті виконано розбірними з двох пластин різної товщини, причому в одній пластині виконано зигзагоподібні канали, інша - герметично закриває їх.



(11) **145242**(19) **UA**(51) **МПК****C02F 11/04 (2006.01)****C02F 101/00 (2006.01)**(21) Номер заявки: **u 2020 04181**(22) Дата подання заявки: **08.07.2020**(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **26.11.2020**(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: **25.11.2020, Бюл. № 22**

(72) Винахідники:

**Заблудський Микола
Миколайович, UA,
Сподоба Михайло
Олексійович, UA,
Сподоба Олександр
Олексійович, UA**

(73) Володілець:

**НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
УКРАЇНИ,
вул. Героїв Оборони, 15, м.
Київ-41, 03041, UA**

(54) Назва корисної моделі:

БІОГАЗОВИЙ РЕАКТОР

(57) Формула корисної моделі:

Біогазовий реактор, який містить резервуар, закритий каркасом теплиці, біомасу, штуцер відведення біогазу, встановлені на валу підігрівач біомаси і лопатевий перемішувач, бункер завантаження біомаси з шибєрною засувкою, який відрізняється тим, що вал виконано порожнистим, лопатевий перемішувач виконано у вигляді лопатей з внутрішніми порожнистими каналами зигзагоподібної форми, підігрівач біомаси виконано у вигляді гнучкого електричного нагрівального елемента, що має секційно з'єднані між собою прямолінійні і зигзагоподібні ділянки, які розташовані відповідно у порожнистому валу і лопатях лопатевого перемішувача, і приєднаного до джерела постійного або змінного електричного струму живлення через вибухобезпечні ковзні контакти, лопаті лопатевого перемішувача розташовані під кутом до осі порожнистого вала і виконані розбірними з двох пластин різної товщини, в одній з яких виконано порожнисті канали зигзагоподібної форми.



(11) **147391**(19) **UA**(51) МПК
C02F 11/04 (2006.01)
C02F 101/00 (2006.01)

(21) Номер заявки:	u 2020 07103	(72) Винахідники:	Заблудський Микола Миколайович, UA, Сподоба Михайло Олексійович, UA, Сподоба Олександр Олексійович, UA
(22) Дата подання заявки:	05.11.2020		
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності:	06.05.2021		
(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня:	05.05.2021, Бюл. № 18	(73) Володілець:	НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ-41, 03041, UA

(54) Назва корисної моделі:

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМУ УТВОРЕНОГО У БІОГАЗОВИХ РЕАКТОРАХ БІОГАЗУ

(57) Формула корисної моделі:

Пристрій для визначення об'єму утвореного у біогазових реакторах біогазу, що містить дві трубки, одна з яких загнута під прямим кутом, а її відкрите сопло направлено у напрямку набігання потоку, а друга трубка через просвердлений отвір приєднана до циліндричної поверхні газопроводу, який відрізняється тим, що до протилежних кінців двох трубок під'єднаний диференціальний датчик тиску, у газопроводі додатково встановлені: датчик вимірювання температури біогазу, газоаналізатор та мікроконтролерний пристрій обчислення, реєстрації і відображення інформації.

ДОДАТОК Є

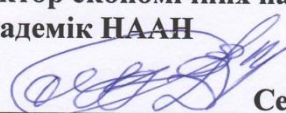
ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
та інноваційної діяльності
Національного університету
біоресурсів і природокористування
України, доктор
сільськогосподарських наук, доцент


Вадим КОНДРАТЮК
«07» 2023 р.

ПОГОДЖЕНО

Проректор з науково-педагогічної
роботи та розвитку Національного
університету біоресурсів і
природокористування України,
доктор економічних наук, професор,
академік НААН

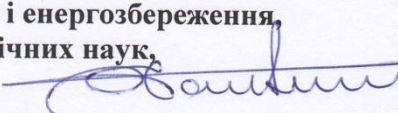

Сергій КВАША
«07» 02 2023 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертації
у навчальний процес

Даним актом стверджується, що результати дисертації на тему: «Електротепломеханічна система біогазового реактора для фермерських господарств», яка представлена на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», виконаної Сподобою Михайлом Олексійовичем, було впроваджено у навчальну програму при викладанні дисципліни «Управління енергоефективністю електромеханічних перетворювачів енергії» на кафедрі електротехніки, електромеханіки та електротехнологій при підготовці фахівців ОКР «Магістр» у Національному університеті біоресурсів і природокористування України.

Директор ННІ Енергетики,
автоматики і енергозбереження,
доктор технічних наук,
професор


Віктор КАПЛУН

Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій,
кандидат технічних наук,
доцент


Олександр ОКУШКО