

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра механіки та інженерії агроecosистем

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**ЗІКРАНЕЦЬ Микола Валерійович**

УДК 620.92

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Обґрунтування конструкції малої біогазової станції на  
перепелиній фермі**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_М.В.Зікранець

**Керівник роботи**

Кухарець С. М.

Доктор технічних наук, професор

**Житомир – 2021**

## АНОТАЦІЯ

**ЗІКРАНЕЦЬ Микола Валерійович. Обґрунтування конструкції малої біогазової станції на перепелиній фермі.** – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

Біогаз це паливний газ, який отримується при розкладанні біологічної сировини. Це біологічна суміш, яка складається із метану (до 65%) та вуглекислого газу. У сільському господарстві біогаз можна отримати за рахунок анаеробного розпаду різних відходів основних видів діяльності сільськогосподарського підприємства та інших біологічних відходів. Відходи збирають у метантенки, де вони піддаються впливу бактерій, що виробляють метан. Процес когенерації дозволяє отримувати електроенергію та тепло від одного джерела. Когенераційна установка є міні теплоелектроцентраль, але з коефіцієнтом корисної дії від 85 відсотків до 90 відсотків. Такі установки можуть функціонувати як на традиційному джерелі (природний газ), так і на будь-якому іншому альтернативному джерелі отримання енергії (газ зі вмістом метану 50-65 відсотків), що робить їх універсальними.

За розрахованими параметрами вибираємо когенераційну установку TEDOM Quanto D1600 з максимальною електричною потужністю 1560 кВт та максимальною тепловою потужністю 1584кВт. Тип генератора MJH 560 LA4. Вона також включає охолоджувач двигуна – теплообмінний апарат і відцентровий насос з приводом від електродвигуна. За знайденими з балансів теплообмінників витратам та температур води, вибираємо пластинчастий теплообмінник - ET-041c-10-277.

*Ключові слова: когенераційна установка, теплоносій, насос, теплообмінник*

## ANNOTATION

**ZIKRANETS Mykola. Substantiation of design of small biogas plant on a quail farm.** – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering.  
– Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

Biogas is a fuel gas produced by the decomposition of biological raw materials. It is a biological mixture consisting of methane (up to 65%) and carbon dioxide. In agriculture, biogas can be obtained through the anaerobic decomposition of various wastes of the main activities of the agricultural enterprise and other biological wastes. Waste is collected in methane tanks, where they are exposed to methane-producing bacteria. The cogeneration process allows you to get electricity and heat from one source. The cogeneration unit is a mini thermal power plant, but with an efficiency of 85 percent to 90 percent. Such installations can operate both on a traditional source (natural gas) and on any other alternative source of energy (gas with a methane content of 50-65 percent), which makes them universal.

According to the calculated parameters, we choose the TEDOM Quanto D1600 cogeneration unit with a maximum electric power of 1560 kW and a maximum thermal power of 1584 kW. Generator type MJH 560 LA4. It also includes a motor cooler - heat exchanger and a centrifugal pump driven by an electric motor. According to the costs and water temperatures found from the balances of heat exchangers, we choose a plate heat exchanger - ET-041s-10-277.

*Key words: cogeneration unit, heat carrier, pump, heat exchanger*

## Зміст

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ВИБІР СХЕМИ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ НА ПЕРЕПЕЛИНІЙ ФЕРМІ .....	7
Висновок до розділу 1.....	10
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ.....	12
Висновок до розділу 2.....	26
РОЗДІЛ 3 ВИБІР ДОПОМІЖНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	27
Висновок до розділу 3.....	31
ВИСНОВКИ.....	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	33

## ВСТУП

Альтернативна енергетика все більше привертає уваги власників як великих так і малих підприємств. Серед можливих напрямів використання альтернативних джерел енергії є застосування когенераційних установок, що використовують як паливо біогаз [1].

Біогаз це паливний газ, який отримується при розкладанні біологічної сировини. Це біологічна суміш, яка складається із метану (до 65%) та вуглекислого газу. У сільському господарстві біогаз можна отримати за рахунок анаеробного розпаду різних відходів основних видів діяльності сільськогосподарського підприємства та (або) інших біологічних відходів. Відходи збирають у метантенки, де вони піддаються впливу бактерій, що виробляють метан [1, 2, 3].

Процес когенерації дозволяє отримувати електроенергію та тепло від одного джерела. Когенераційна установка має міні теплоелектроцентральної, але з коефіцієнтом корисної дії від 85 відсотків до 90 відсотків. Такі установки можуть функціонувати як на традиційному джерелі (природний газ), так і на будь-якому іншому альтернативному джерелі отримання енергії (газ зі вмістом метану 50-65 відсотків), що робить їх універсальними [4-5].

**Мета і задачі дослідження.** Мета дослідження – підвищити рівень ефективності використання біогазу внаслідок обґрунтування параметрів когенераційної установки.

Згідно до мети магістерської роботи сформовано наступні задачі:

- провести вибір схеми використання біогазу на перепелиній фермі
- виконати розрахунок параметрів когенераційної установки
- здійснити вибір допоміжного обладнання

**Об'єкт дослідження:** когенераційна установка біогазової станції

**Предмет дослідження:** конструкторсько-технологічні параметри когенераційної установки.

**Методи дослідження:** Експериментальні дослідження проведено із застосуванням методів гідравліки та теплотехніки.

**Практичне значення одержаних результатів.** Дослідження направлені на вдосконалення виробництва біогазу в аграрних підприємствах. На основі проведених досліджень обґрунтовано процес роботи когенераційної установки біогазової станції із отриманням тепла та електричної енергії.

**Структура та обсяг роботи.** Магістерська робота містить вступ, три розділи, висновки, список інформаційних джерел з 11 джерел. Загальний обсяг роботи становить 34 сторінки комп'ютерного тексту.

## РОЗДІЛ 1

### ВИБІР СХЕМИ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ НА ПЕРЕПЕЛИНІЙ ФЕРМІ

Альтернативна енергетика все більше привертає уваги власників як великих так і малих підприємств. Серед можливих напрямів використання альтернативних джерел енергії є застосування когенераційних установок, що використовують як паливо біогаз [1].

Біогаз це паливний газ, який отримується при розкладанні біологічної сировини. Це біологічна суміш, яка складається із метану (до 65%) та вуглекислого газу. У сільському господарстві біогаз можна отримати за рахунок анаеробного розпаду різних відходів основних видів діяльності сільськогосподарського підприємства та (або) інших біологічних відходів. Відходи збирають у метантенки, де вони піддаються впливу бактерій, що виробляють метан [1, 2, 3].

Процес когенерації дозволяє отримувати електроенергію та тепло від одного джерела. Когенераційна установка має міні теплоелектроцентральної, але з коефіцієнтом корисної дії від 85 відсотків до 90 відсотків. Такі установки можуть функціонувати як на традиційному джерелі (природний газ), так і на будь-якому іншому альтернативному джерелі отримання енергії (газ зі вмістом метану 50-65 відсотків), що робить їх універсальними [4-5].

Сучасні когенераційні біогазові установки забезпечують виробництво електричної та теплової енергії за рахунок утилізації відходів підприємств аграрного сектора економіки, а також міських сміттєзвалищ та каналізації. В даний час така технологія отримання енергії вбачається найперспективнішою для використання у всіх економічно розвинутих країнах світу, оскільки передбачає використання альтернативних джерел отримання енергії (біогаз як паливо) для когенераційних установок [5].

Практичне застосування даного виду установки може досить суттєво зменшити витрати на тепло та електроенергію, адже можна отримувати енергію з

дешевої сировини або ж відходів. Когенераційні установки використовуються для вироблення електроенергії та теплової енергії одночасно [5].

Принцип дії когенераційної установки є досить простим. Використовуючи енергію, яка утворюється при згорянні біогазу, газопоршневий двигун обертає електрогенератор, який виробляє електроенергію. Тепло, що залишилось проходить через систему теплообмінників. Відведена теплота може використовуватися в системі опалення, теплопостачання та кондиціонування, тощо [4-5].

Когенераційні установки також можна використовувати в умовах незначного обсягу біогазу, що подається або біогазу поганої якості. В такому випадку можливе збагачення біогазу змішуванням із природним газом, або повне переведення роботи установки на природний газ.

Когенераційні установки використовуються не тільки як резервні або допоміжні джерела теплової та електричної енергії, але і як незалежні міні-теплоенергоцентралі. Вони можуть бути збудовані одразу біля споживачів, тому немає необхідності у створенні дорогих ліній електропередачі та підстанцій. Використання подібних установок надають можливість опалювати досить великі промислові об'єкти або групи житлових чи громадських будівель, та забезпечувати їх електроенергією. Потужність однієї когенераційної системи коливається в межах від 24 кВт до 2000 кВт. Мінімальна потужність, що рекомендується для забезпечення економічної ефективності становить від 120 кВт [2].

Світовий досвід показує, що є значна кількість розробленого енергетичного обладнання та виробляється чимало енергетичного обладнання призначеного для використання альтернативних джерел. Застосовувати когенераційні установки для автономного споживання дешевше, ніж споживати електроенергію із центральної мережі, так як вони дозволяють отримувати дешевшу енергію, менше забруднюють довкілля та безпечніші в експлуатації [5].

Слід відмітити економічну вигоду від використання когенераційних установок:



– загальна вартість виробленої за допомогою когенерації електричної та теплової енергії може бути у 2 – 2, 5 рази дешевша ніж від централізованого постачання;

- можливий термін окупності когенераційних установок 1 - 4 роки;

- термін експлуатації когенераційних установок становить приблизно 25 - 30 років.

Енерготехнологічна схема використання когенераційної установки вибирається за параметрами суміші, яка буде подаватись у компресор. В нашому дослідженні це суміш повітря та біогазу (витрата, температура, початковий тиск, нижча теплота згоряння біогазу). На рисунку 1.1 показано схему когенераційної установки, яка працює на біогазі.

Принцип роботи установки є наступним. У компресор подається суміш повітря та біогазу, де відбувається процес стиснення до певних параметрів  $p_2$  і  $t_2$ . Після компресора суміш подається у двигун внутрішнього згоряння, де в камері згоряння суміш згоряє, у процесі чого утворюються димові гази та за допомогою генератора - електроенергія. Після двигуна внутрішнього згоряння димові гази подаються в турбіну, де відбувається розширення та зменшення температури до  $t_4$ . Далі димові гази надходять у теплообмінник, де вони охолоджуються до температури  $t_5$ , після чого їх скидають в атмосферу. Етиленгліколь 20%, проходячи через систему охолодження, представлену теплообмінником та насосом, охолоджує двигун внутрішнього згоряння. Вода, проходячи через систему теплообмінників нагрівається димовими газами від температури  $t_{13}$  до температури  $t_{14}$ , віддає частину теплоти воді, що надходить та нагріває її до температури  $t_{10}$ . Вода з температурою  $t_{10}$  надходить до споживача. Охолоджена вода в подальшому подається до теплообмінника та нагрівається до  $t_{13}$ . [4, 5].

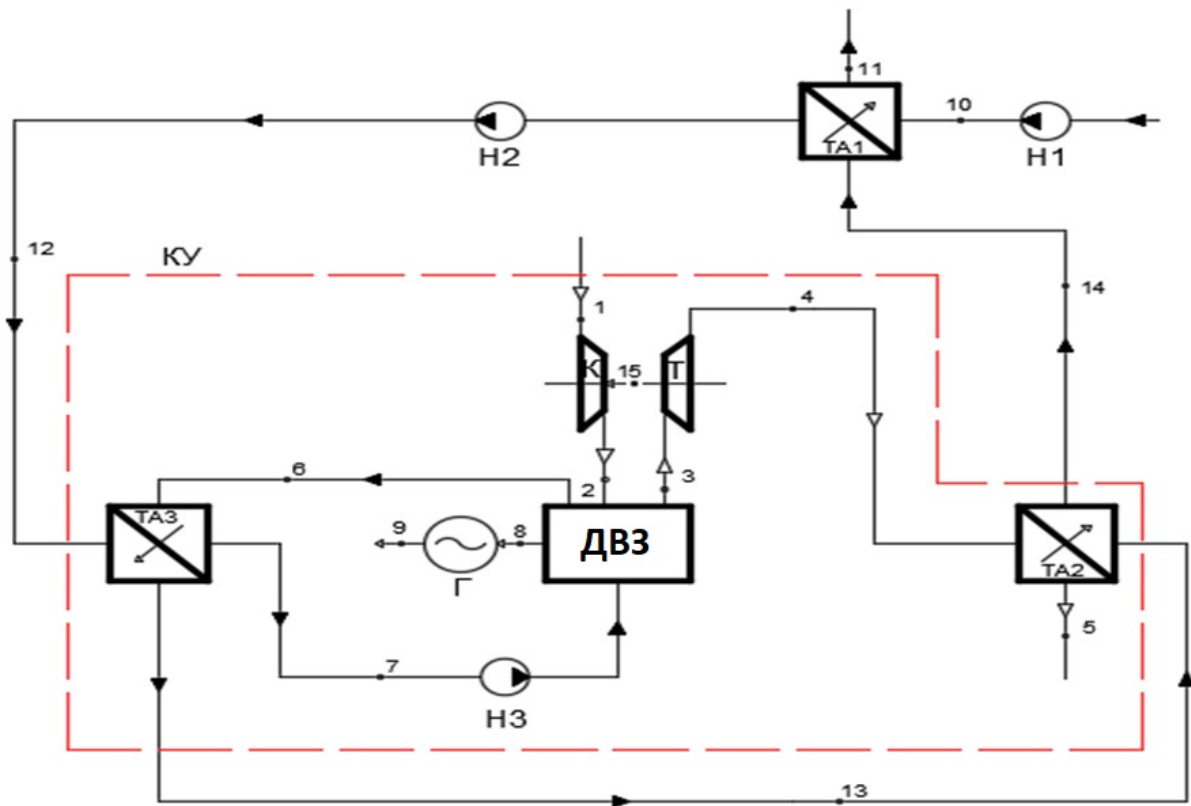


Рис. 1.1. Схема когенераційної установки, що працює на біогазі  
 КУ –когенераційна установка газопоршневого типу, К – компресор, Т – турбіна,  
 ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння, Г – генератор, Н<sub>і</sub> – насос, ТА<sub>і</sub> –  
 теплообмінний агрегат.

Отже, при практичному застосуванні такої технічної системи енергія спалювання палива перетворює в електроенергію та теплову енергію, що надходить для нагрівання води, яка потрапляє до споживача.

### Висновок до розділу 1

Біогаз це паливний газ, який отримується при розкладанні біологічної сировини. Це біологічна суміш, яка складається із метану (до 65%) та вуглекислого газу. У сільському господарстві біогаз можна отримати за рахунок анаеробного

розпаду різних відходів основних видів діяльності сільськогосподарського підприємства та (або) інших біологічних відходів. Відходи збирають у метантенки, де вони піддаються впливу бактерій, що виробляють метан. Процес когенерації дозволяє отримувати електроенергію та тепло від одного джерела. Когенераційна установка є міні теплоелектроцентральною, але з коефіцієнтом корисної дії від 85 відсотків до 90 відсотків. Такі установки можуть функціонувати як на традиційному джерелі (природний газ), так і на будь-якому іншому альтернативному джерелі отримання енергії (газ зі вмістом метану 50-65 відсотків), що робить їх універсальними.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

Для ефективного застосування технічного устаткування слід провести певні розрахунки.

#### І. Розрахунок компресора.

Розрахунок температури суміші яка виходить з компресора проведемо за формулою 2.1:

$$t_2 = (t_1 + 273) \cdot \left( \frac{p_k}{p_H} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 273 \quad (2.1)$$

де  $t_1$  - температура на вході в компресор, температура навколишнього середовища, приймаємо 20 °C;

$p_k = p_2$  - тиск на виході з компресора знаходимо за формулою 2.2;

$p_H = p_1$  - тиск на вході в компресор приймаємо  $p_H = 0,1$  МПа;

$k$  - показник адіабати для багатоатомних газів 1,33.

Розрахунок тиску на виході з компресора:

$$\beta = p_k / p_H \quad (2.2)$$

де  $\beta$  - ступінь стиснення, приймаємо рівним 3.

$$p_k = 3 \cdot 0,1 = 0,3 \text{ МПа}$$

$$t_2 = (20 + 273) \cdot \left( \frac{0,3}{0,1} \right)^{\frac{1,33-1}{1,33}} - 273 = 111,814 \text{ °C}$$

Кількість газу, що виробляється станцією визначимо за формулою 2.3:

$$G'_1 = G_0 \cdot V_0 \cdot n \quad (2.3)$$

де  $G_0$  - кількість відходів, від однієї птиці,  $G_0 = 175 \text{ г / добу}$ ; [1]

$V_0$  - вихід біогазу з 1 т відходів,  $V_0 = 100 \text{ м}^3 / \text{т}$ ; [2]

$n$  - кількість голів на підприємстві,  $n = 400000$  шт.

$$G'_1 = \frac{175 \cdot 100 \cdot 400000}{1000000} = 7000 \text{ м}^3 / \text{добу}$$

$$G'_1 = \frac{7000}{24 \cdot 3600} = 0,081 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Кількість повітря, яке подається на змішування з біогазом для горіння, знайдемо за формулою 2.4:

$$G''_1 = G'_1 \cdot \alpha \quad (2.4)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт надлишку повітря,  $\alpha = 7 \text{ м}^3_{\text{повітря}} / \text{м}^3_{\text{біогазу}}$ ; [3]

$$G''_1 = 0,081 \cdot 7 = 0,567 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Кількість суміші, що подається в компресор, а потім на горіння у ДВЗ, знайдемо за формулою 2.5:

$$G_1 = G'_1 + G''_1 \quad (2.5)$$

$$G_1 = 0,081 + 0,567 = 0,648 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Розрахунок потужності компресора:

$$N_{15} = A_{\text{ст}} \cdot G_1 / \eta_{\text{мех}}^k / \eta_{oi}^k \quad (2.6)$$

де  $A_{\text{ст}}$  - робота стиску компресора;

$\eta_{\text{мех}}^k$  - механічний КПД, прийmemo 0,99;

$\eta_{oi}^k$  - відносний внутрішній ККД компресора, приймаємо 0,75;

$G_1$  – витрата суміші біогазу з повітрям, отриманий за формулою 2.5.

Розрахунок роботи стиснення компресора:

$$A_{\text{сж}} = \frac{P_H \cdot G_1 \cdot k}{k-1} \cdot \left[ \left( \frac{P_K}{P_H} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2.7)$$

$$A_{\text{сж}} = \frac{0,1 \cdot 1000000 \cdot 0,648 \cdot 1,33}{1,33-1} \cdot \left[ \left( \frac{0,3}{0,1} \right)^{\frac{1,33-1}{1,33}} - 1 \right] = 81856,698 \text{ кДж/кг}$$

$$N_{15} = 81856,698 \cdot 0,648 / 0,98 / 0,75 = 30,936 \text{ кВт.}$$

Слідуючим кроком є розрахунок турбіні. Для цього знадобиться температура димових газів на виході з двигуна внутрішнього згоряння -  $t_3$ .

Суміш, що входить у компресор, складається з біогазу і повітря, а біогаз у свою чергу із метану (CH<sub>4</sub>), вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) та інших газів кількість яких вкрай низька. Відсотковий вміст метану в біогазі задано 34%, отже, практично вся частина, що залишилася, це вуглекислий газ – 66 %.

Для подальших розрахунків необхідно знайти постійну газову суміші. Виходячи з витрати суміші газів на горіння та відсоткового вмісту всіх газів у суміші можемо знайти їх об'ємні частки за такою формулою:

Об'ємна частка  $i$ -го елемента суміші:

$$r_i = V'_i / V_{\Sigma} \quad (2.8)$$

де  $V'_i$  - об'єм  $i$ -го елемента в загальному об'ємі суміші;

$V_{\Sigma}$  - загальний об'єм суміші.

Молярну масу суміші знайдемо з виразу 2.9:

$$M_{\text{см}} = \sum r_i \cdot M_i \quad (2.9)$$

де  $M_i$  - молярна маса  $i$ -го елемента в суміші.

Проведемо розрахунок об'ємних часток кожного компонента:

$$r_1 = 0,34 \cdot G'_1 / G_1 = 0,34 \cdot 0,081 / 0,648 = 0,0425.$$

$$r_2 = (1 - 0,34) \cdot G'_1 / G_1 = 0,66 \cdot 0,081 / 0,648 = 0,0825 .$$

$$r_3 = G''_1 / G_1 = 0,567 / 0,648 = 0,8750 .$$

Перевірка умови  $r_\Sigma = 1$  :

$$r_\Sigma = r_1 + r_2 + r_3 = 0,0425 + 0,0825 + 0,875 = 1 .$$

З формули 2.9:

$$M_{cm} = r_1 \cdot M_1 + r_2 \cdot M_2 + r_3 \cdot M_3$$

де  $M_1$  – молярна маса метана,  $M_1 = 16$  кг/кмоль;

$M_2$  – молярна маса повітря,  $M_2 = 28,9$  кг/кмоль;

$M_3$  – молярна маса вуглекислого газу,  $M_3 = 44$  кг/кмоль.

$$M_{cm} = 0,0425 \cdot 16 + 0,0825 \cdot 28,9 + 0,875 \cdot 44 = 29,598 \text{ кг / кмоль}$$

Знайшовши всі необхідні параметри, з рівняння 2.10 знайдемо постійну газову суміші:

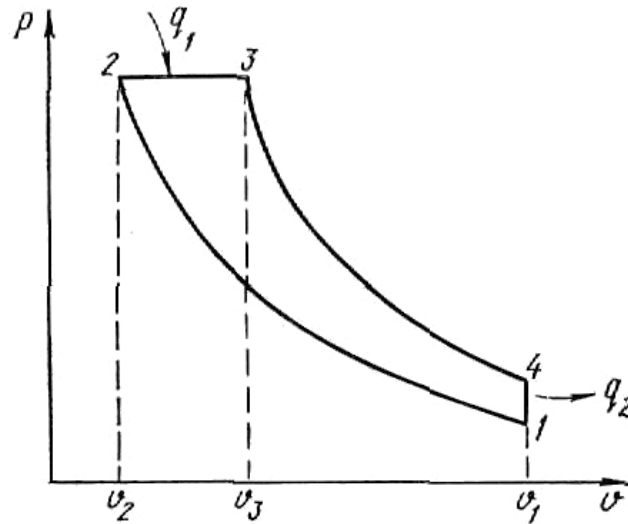
$$R_{cm} = R_m / M_{cm} \tag{2.10}$$

де  $R$  – універсальна газова постійна,  $R_m = 8314$  Дж/(кмоль\*К).

$$R_{cm} = 8314 / 29,598 = 280,902 \text{ Дж / (кг \cdot К)} .$$

Проведемо розрахунок ДВЗ за циклом Дизеля для визначення температури  $t_3$  перед турбіною. [13]

На рисунку 2.1 представлено цикл Дизеля, який складається з двох ізотерм 1-2 та 3-4, ізобари 2-3 та ізохори 4-1.



**Рисунок 2.1.** Зображення циклу Дизеля на  $p$ - $v$  діаграмі

Для розрахунку точок, приймемо, що ступінь стиснення  $\epsilon = 13$  та ступінь попереднього розширення  $\rho = 1,2$ .

**Точка 1.**

Тиск суміші на вході дорівнює тиску на виході з компресора  $p_1 = p_k = 0,3\text{МПа}$  і температура суміші на вході дорівнює температурі суміші на виході з компресора  $t_1 = 111,814\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_1 = t_1 + 273,15 = 384,964\text{ К}$ .

Питомий об'єм суміші в точці 1 знайдемо за формулою 2.11.1:

$$v_1 = R_{cm} \cdot T_1 / p_1 \quad (2.11.1)$$

$$v_1 = 280,902 \cdot 384,964 / 0,3 / 1000000 = 0,360 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

**Точка 2.**

Питомий об'єм суміші в точці 2 знайдемо за формулою 2.11.2:



$$v_2 = v_1 / \varepsilon \quad (2.11.2)$$

$$v_1 = 0,360 / 13 = 0,028 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Тиск в точці 2 знайдемо за формулою 2.11.3:

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k \quad (2.11.3)$$

де  $k$  – показник адіабати, для багатоатомних газів  $k = 1,33$ ;

$$p_2 = 0,3 \cdot 13^{1,33} = 9,092 \text{ МПа}.$$

Температуру суміші в точці 2 знайдемо за формулою 2.11.4:

$$t_2 = t_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \quad (2.11.4)$$

$$t_2 = 384,96 \cdot 13^{1,33-1} = 897,474 \text{ К}.$$

### Точка 3.

Так як у точці 3 відбувається ізобарне підведення теплоти, то і тиск  $p_3 = p_2 = 9,092 \text{ МПа}$ .

Питомий об'єм суміші в точці 3 знайдемо за формулою 2.11.5:

$$v_3 = v_2 \cdot \rho / \varepsilon \quad (2.11.5)$$

$$v_3 = 0,028 \cdot 1,2 / 13 = 0,003 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Температуру суміші в точці 3 знайдемо за формулою 2.11.6

$$t_3 = t_2 \cdot \rho \cdot \varepsilon^{k-1} \quad (2.11.6)$$

$$t_3 = 897,474 \cdot 1,2 \cdot 13^{1,33-1} = 2019,745 \text{ К}$$

$$t_3 = 2019,745 - 273,15 = 1746,595 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

### Точка 4.

Так як у точці 4 відбувається ізохорне відведення теплоти, то і питомий обсяг  $v_3 = v_4 = 0,360 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Тиск суміші у точці 4 знайдемо за формулою 2.11.7:

$$p_4 = p_3 \cdot \rho^k \quad (2.11.7)$$

$$p_2 = 0,3 \cdot 1,2^{1,33} = 0,382 \text{ МПа}$$

Температуру суміші у точці 4 знайдемо за формулою 2.11.8:

$$t_4 = t_1 \cdot \rho^k \quad (2.11.8)$$

$$t_4 = 384,96 \cdot 1,2^{1,33} = 415,648 \text{ К}$$

$$t_4 = 415,648 - 273,15 = 142,498 \text{ }^\circ\text{C}.$$

На цьому розрахунок циклу Дизеля завершується.

Так як для додаткового знімання тепла в нашій когенераційній установці є теплообмінник ТА2, призначений для утилізації тепла димових газів до температури  $t_3$ , тоді приймемо температуру газів у точці 3, рівну  $1746,595 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Розрахунок турбіни

З балансу турбіни виражаємо температуру димових газів, що виходять:

$$t_4 = (G_3 \cdot c_{p3} \cdot t_3 - N_{15} \cdot \eta_{oi}^m) / G_4 / c_{p4} \quad (2.12)$$

де  $G_4$  - об'ємна витрата димових газів на виході з турбіни,  $G_4 = 0,648 \text{ м}^3/\text{с}$ ;

$G_3$  - об'ємна витрата димових газів на виході з ДВЗ - на вході в турбіну,  $G_3 = 0,648 \text{ м}^3/\text{с}$ ;

$c_{p4}, c_{p3}$  - питома теплоємність димових газів,  $0,283 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ; [8]

$\eta_{oi}^T$  - відносний внутрішній ККД турбіни, приймемо рівним  $0,8$ ; [4]

$t_3$  - температура димових газів на вході в турбіну, знайдемо за формулою 2.11.6 та становить  $t_3 = 1746,595 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$t_4 = (0,648 \cdot 0,283 \cdot 1746,595 - 30,936 \cdot 0,8) / 0,648 / 0,283 = 1611,67 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

### Розрахунок ДВЗ

#### Розрахуємо потужність на валу генератора:

$$N_8 = \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{двз}} \cdot (G'_1 \cdot (c''_{\text{рз}} \cdot t_2 + Q_{\text{н}}^{\text{р}}) + G''_1 \cdot c_{\text{рн}} \cdot t_2) - G_3 \cdot c_{\text{рз}} \cdot t_3 \quad (2.13)$$

де  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  - нижча робоча теплота згоряння біогазу, 23 МДж/м<sup>3</sup>; [3]

$C''_{\text{рз}}$  - питома теплоємність біогазу на виході з компресора при  $t_2 = 111,814^\circ\text{C}$ ,

$$C''_{\text{рз}} = 1,272 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}); [8]$$

$c_{\text{рн}}$  - питома теплоємність повітря при  $t_2$ , розраховуємо за формулою 2.13.1;

$\eta_{\text{двз}}$  - ККД двигуна внутрішнього згоряння,  $\eta_{\text{двз}} = 0,86$ ;

$\eta_{\text{мех}}$  - механічний ККД двигуна,  $\eta_{\text{мех}} = 0,99$ ;

$$C_{\text{рн}} = \frac{k \cdot R_{\text{м}}}{(k - 1) \cdot M_{\text{н}} \cdot 1000} \quad (2.13.1)$$

де  $k$  – показник адіабати, для двоатомних газів  $k = 1,4$ ;

$$C_{\text{рн}} = \frac{1,4 \cdot 8314}{(1,4 - 1) \cdot 28,9 \cdot 1000} = 1,007 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot \text{К})$$

$$N_8 = 0,86 \cdot 0,99 \cdot (0,081 \cdot (1,272 \cdot 111,814 + 23000) + 0,567 \cdot 1,007 \cdot 111,814) - 0,648 \cdot 0,283 \cdot 1746,595 = 1330,322 \text{ кВт}$$

Кількість енергії  $N_9$ , що виробляється з урахуванням втрат у генераторі, знаходимо за формулою 2.14:

$$N_9 = N_8 \cdot \eta_2 \quad (2.14)$$

где  $\eta_z$  – ККД генератора,  $\eta_z = 0,96$ ; [5]

$$N_9 = 1330,322 \cdot 0,96 = 1277,110 \text{ кВт}$$

### Загальний баланс ДВЗ

З балансу двигуна внутрішнього згоряння знаходимо витрату етиленгліколю 20% -  $G_7 = G_6$ :

$$G_7 = \frac{(G'_1 \cdot (Q_{\text{н}}^p + c''_{p2} \cdot t_2) + G''_1 \cdot c_{p6} \cdot t_6) - G_1 \cdot c_{p3} \cdot t_3 - N_8}{t_6 \cdot c_{p6} - t_7 \cdot c_{p7}} \quad (2.15)$$

де  $t_7$  - температура етиленгліколю 20% на виході з ДВЗ,  $90^\circ\text{C}$ ;

$t_8$  - температура етиленгліколю 20% на вході ДВЗ,  $70^\circ\text{C}$ ;

$c_{p7}$  - питома теплоємність етиленгліколю 20% за температури  $t_7$ ,  $c_{p7} = 2,606 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ ; [6]

$c_{p6}$  - питома теплоємність етиленгліколю 20% за температури  $t_6$ ,  $c_{p6} = 2,696 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ ; [6]

$$G_7 = \frac{(0,081 \cdot (23000 + 111,814 \cdot 1,272) + 0,567 \cdot 111,814 \cdot 1,007)}{90 \cdot 2,696 - 70 \cdot 2,606} - \frac{0,648 \cdot 0,283 \cdot 1746,595 - 1330,322}{90 \cdot 2,696 - 70 \cdot 2,606} = 4,784 \text{ кг/с}$$

### Розрахунок теплообмінних апаратів

З повних енергетичних балансів теплообмінників знаходимо невідомі параметри: витрати води  $G_{12} = G_{13} = G_{14}$ , води  $G_{10} = G_{11}$  та температуру води  $t_{14}$ :

$$\begin{cases} G_7 \cdot c_{p7} \cdot t_7 + G_{13} \cdot c_{p13} \cdot t_{13} = G_{12} \cdot c_{p12} \cdot t_{12} + G_6 \cdot c_{p6} \cdot t_6; \\ G_4 \cdot c_{p4} \cdot t_4 + G_{13} \cdot c_{p13} \cdot t_{13} = G_{14} \cdot c_{p14} \cdot t_{14} + G_5 \cdot c_{p5} \cdot t_5; \\ G_{14} \cdot c_{p14} \cdot t_{14} + G_{10} \cdot c_{p10} \cdot t_{10} = G_{12} \cdot c_{p12} \cdot t_{12} + G_{11} \cdot c_{p11} \cdot t_{11}. \end{cases} \quad (2.16)$$

де  $t_{12}$  - температура холодної води, що йде на ТАЗ, для охолодження етиленгліколю 20%,  $t_{12} = 66^\circ\text{C}$ ;

$t_{13}$  - температура гарячої води після ТА3, нагріта етиленгліколем 20%,  $t_{13} = 85$  °C;

$t_{14}$  - температура води, нагрітої димовими газами від КУ,  $t_{14} = 100,731$  °C ;

$t_{10}$  - температура холодної води від споживача,  $t_{10} = 65$  °C;

$t_{11}$  - температура нагрітої води, що йде на споживача,  $t_{11} = 90$  °C;

$t_5$  - температура димових газів на виході з КУ,  $t_5 = 120$  °C;

$c_{p5}$  - питома теплоємність димових газів при  $t_5$  на виході з ТА2,  $C_{p5} = 0,976$  кДж/(м<sup>3</sup>\*К); [8]

$c_{p10} = c_{p11} = c_{p12} = c_{p13} = c_{p14}$  - питома теплоємність води,  $C_{p10} = 4,187$  кДж/(кг\*К);

$$\begin{cases} 4,784 \cdot 2,606 \cdot 70 + G_{13} \cdot 4,187 \cdot 85 = G_{12} \cdot 4,187 \cdot 66 + 4,784 \cdot 2,696 \cdot 90; \\ 0,648 \cdot 0,301 \cdot 1611,67 + G_{13} \cdot 4,187 \cdot 85 = G_{14} \cdot 4,187 \cdot t_{14} + 0,648 \cdot 0,976 \cdot 120; \\ G_{14} \cdot 4,187 \cdot t_{14} + G_{10} \cdot 4,187 \cdot 65 = G_{12} \cdot 66 \cdot 4,187 + G_{11} \cdot 4,187 \cdot 90. \end{cases}$$

$$G_{12} = 3,622 \text{ кг/с};$$

$$t_{14} = 101,731 \text{ °C};$$

$$G_{10} = 5,031 \text{ кг/с}.$$

За розрахованими параметрами вибираємо когенераційну установку TEDOM Quanto D1600 [9] з максимальною електричною потужністю 1560 кВт та максимальною тепловою потужністю 1584кВт. Тип генератора МЖН 560 LA4. Вона також включає охолоджувач двигуна – теплообмінний апарат ТА3 і відцентровий насос з приводом від електродвигуна – Н1.



Рис. 2.1. Когенераційна установка TEDOM Quanto D1600 [9]

За знайденими з балансів теплообмінників витратам та температур води, вибираємо пластинчастий теплообмінник - ET-041c-10-277 [10].

Побудуємо діаграму Сенкі, яка є графічною інтерпретацією виконання першого закону термодинаміки в рамках певної технічної системи. Елементи схеми представлені у вигляді блоків, з одного боку яких розташовуються вхідні потоки, з іншого – вихідні. Потоки представлені у вигляді смуг, ширина яких пропорційна енергії, що переноситься потоком. Ширина вхідних та вихідних ліній кожного блоку рівні між собою. Також сума ширини смуг вхідних та вихідних потоків системи рівні між собою. Прийmemo проміжок розрахунку рівний одній секунді.

Прийmemo масштаб діаграми 1 мм = 50 кДж/с.

Кількість енергії, що переноситься потоком, визначаємо за формулою:

$$W_i = G_i \cdot h_i \quad (2.17)$$

де  $W_i$  - енергія, що переноситься потоком, кДж/с;

$G_i$  - витрата  $i$ -го потоку, кг/с ( $\text{м}^3/\text{с}$ );

$h_i$  - питома ентальпія  $i$ -го потоку, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>), що визначається за параметрами потоку.

Результати розрахунку за формулою представимо у вигляді таблиці 2.1:

Таблиця 2.1

Розрахунок діаграми Сенкі.

Потік	Енергія, кДж/с	Ширина, мм
Основний контур циркуляції води		
Вихід із ТА1 та вхід у ТА3, $G_{12}$	1000,788	20
Вихід із ТА3 та вхід в ТА2, $G_{13}$	1288,893	25,8
Вихід з ТА2 та вхід в ТА1, $G_{14}$	1527,423	30,5
Вода споживача		
Вхід в ТА1, $G_{10}$	1369,252	27,4
Вихід з ТА1, $G_{11}$	1895,888	37,9
Контур охолодження ДВЗ етиленгліколем 20%		
Вихід з ДВЗ та вхід в ТА3, $G_6$	1160,842	23,2
Вихід з ТА3 та вхід в ДВЗ, $G_7$	872,737	17,5

Суміш біогазу з повітрям		
Вхід в компресор, $G_1$	1876,908	37,5
Вихід з компресора та вхід в ДВЗ, $G_2$	1938,799	38,8
Димові гази		
Вихід з ДВЗ та вхід в ТА2, $G_4$	295,622	5,9
Вихід з ТА2, $G_5$	75,895	1,5
Потоки потужностей		
Потужність, що виробляється турбіною та йде на компресор, $N_{15}$	30,936	0,6
Механічна потужність на валу генератора від ДВЗ, $N_8$	1330,322	26,6
Електрична потужність, що виробляється генератором, $N_9$	1277,110	25,5



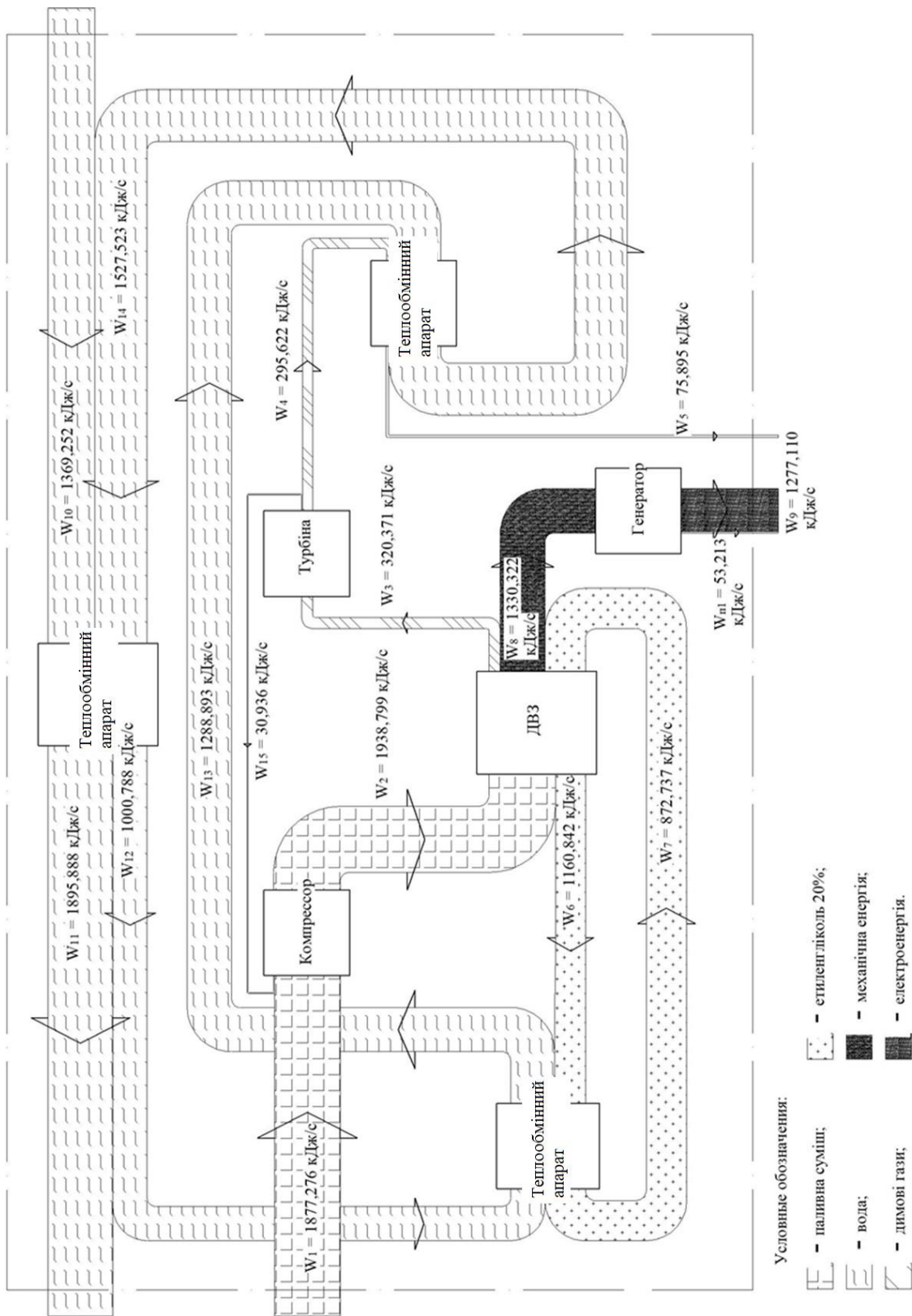


Рис. 2.2. Розрахована діаграма Сенкі.

## **Висновок до розділу 2**

За розрахованими параметрами вибираємо когенераційну установку TEDOM Quanto D1600 з максимальною електричною потужністю 1560 кВт та максимальною тепловою потужністю 1584кВт. Тип генератора MJH 560 LA4. Вона також включає охолоджувач двигуна – теплообмінний апарат ТА3 і відцентровий насос з приводом від електродвигуна – Н1. За знайденими з балансів теплообмінників витратам та температур води, вибираємо пластинчастий теплообмінник - ET-041c-10-277.

## РОЗДІЛ 3

### ВИБІР ДОПОМІЖНОГО ОБЛАДНАННЯ

#### Повний енергобаланс компресора

Матеріальний баланс компресора у загальному вигляді:

$$G_1 = G_2 \quad (3.1)$$

$$G_1 = 0,648 \text{ м}^3/\text{с}$$

Енергетичний баланс компресора у загальному вигляді::

$$G'_1 \cdot (Q_H^p + c'_{p2} \cdot t_2) + G''_1 \cdot c_{p6} \cdot t_6 + N_{15} = G'_1 \cdot (Q_H^p + c''_{p2} \cdot t_2) + G''_1 \cdot c_{p6} \cdot t_6 \quad (3.2)$$

де:  $C'_{pg}$  – теплоємність біогазу на вході в компресор при  $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $C'_{pg} = 1,499 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$ . [5]

$$\begin{aligned} &0,081 \cdot (23000 + 1,499 \cdot 20) + 0,567 \cdot 1,007 \cdot 20 + 30,936 = \\ &= 0,081 \cdot (23000 + 1,272 \cdot 111,814) + 0,567 \cdot 1,007 \cdot 111,814 \end{aligned}$$

$$1908,212 = 1938,799 \text{ кВт}$$

Дисбаланс склав 1,58% через похибки в неправильному обліку теплоємностей газів.

#### Повний енергобаланс турбіни

Матеріальний баланс турбіни:

$$G_3 = G_4 = 0,648 \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.3)$$

Енергетичний баланс турбіни у загальному вигляді:

$$G_3 \cdot t_3 \cdot c_{p3} = G_4 \cdot t_4 \cdot c_{p4} + N_{15} \quad (3.4)$$

$$0,648 \cdot 0,283 \cdot 1746,595 = 0,648 \cdot 0,283 \cdot 1611,670 + 30,936$$

$$320,371 = 326,558 \text{ кВт}$$

Дисбаланс склав 1,89%.

## Повний енергобаланс ДВЗ

Енергетичний баланс ДВЗ:

$$G'_1 \cdot (Q_H^p + c_{p2} \cdot t_2) + G''_1 \cdot c_{p2} \cdot t_2 + G_7 \cdot c_{p7} \cdot t_7 = G_3 \cdot c_{p3} \cdot t_3 + G_6 \cdot c_{p6} \cdot t_6 + N_8 \quad (3.5)$$

$$0,081 \cdot (23000 + 111,814 \cdot 1,272) + 0,567 \cdot 1,007 \cdot 111,814 + 4,784 \cdot 2,606 \cdot 70 = \\ = 0,648 \cdot 0,283 \cdot 1746,595 + 4,784 \cdot 2,696 \cdot 90 + 1330,322$$

$$2811,536 = 2811,536 \text{ кВт}$$

Дисбаланс становить 0%.

Матеріальні баланси:

$$G_2 = G_3 \quad (3.6)$$

$$G_2 = 0,648 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$G_7 = G_6 \quad (3.7)$$

$$G_6 = 4,784 \text{ кг/с.}$$

## Баланси теплообмінників

Баланс теплообмінного апарату з середовищами етиленгліколь 20% та вода – ТАЗ.

Загальний енергетичний баланс:

$$G_6 \cdot c_{p6} \cdot t_6 + G_{12} \cdot c_{p12} \cdot t_{12} = G_7 \cdot c_{p7} \cdot t_7 + G_{13} \cdot c_{p13} \cdot t_{13} \quad (3.8)$$

$$4,784 \cdot 2,606 \cdot 90 + 3,622 \cdot 4,187 \cdot 66 = \\ = 3,622 \cdot 4,187 \cdot 85 + 4,784 \cdot 2,696 \cdot 70$$

$$2161,630 = 2161,630 \text{ кВт}$$

Дисбаланс становить 0%.

Матеріальні баланси:

$$G_7 = G_6 \quad (3.9)$$

$$G_7 = 4,784 \text{ кг/с}$$

$$G_{12} = G_{13} \quad (3.10)$$

$$G_{12} = 3,622 \text{ кг/с}$$

Баланс теплообмінного апарату із середовищем вода та димові гази – ТА2.

Загальний енергетичний баланс:

$$G_4 \cdot c_p \cdot t_4 + G_{13} \cdot c_{p13} \cdot t_{13} = G_{14} \cdot c_{p14} \cdot t_{14} + G_5 \cdot c_{p5} \cdot t_5 \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} &0,648 \cdot 0,283 \cdot 1611,670 + 3,622 \cdot 4,187 \cdot 85 = \\ &= 3,622 \cdot 4,187 \cdot 100,731 + 0,648 \cdot 0,976 \cdot 120 \end{aligned}$$

$$1603,318 = 1603,318 \text{ кВт}$$

Дисбаланс становить 0%.

Матеріальні баланси:

$$G_4 = G_5 \quad (3.12)$$

$$G_4 = 0,648 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$G_{13} = G_{14} \quad (3.13)$$

$$G_{13} = 3,622 \text{ кг/с}.$$

Баланс теплообмінного апарату із середовищами вода та вода – ТА1.

Загальний енергетичний баланс

$$G_{14} \cdot c_{p14} \cdot t_{14} + G_{10} \cdot c_{p10} \cdot t_{10} = G_{12} \cdot c_{p12} \cdot t_{12} + G_{11} \cdot c_{p11} \cdot t_{11} \quad (3.14)$$

$$3,622 \cdot 4,187 \cdot 100,731 + 5,031 \cdot 4,187 \cdot 65 = 3,622 \cdot 4,187 \cdot 66 + 5,031 \cdot 4,187 \cdot 90$$

$$2896,675 = 2896,675 \text{ кг/с}$$

Дисбаланс становить 0%.

Матеріальні баланси:

$$G_{14} = G_{12} \quad (3.15)$$

$$G_{14} = 3,622 \text{ кг/с}$$

$$G_{10} = G_{11} \quad (3.16)$$

$$G_{10} = 5,031 \text{ кг/с}$$

## Підбір допоміжного обладнання

За відомою витратою та напором  $H = 70$  м підбираємо насос Grundfos CRN 15-9 A-CA-A-E-HQQE [11].

Робочі характеристики насоса даної серії представлені на рисунку 3.1.

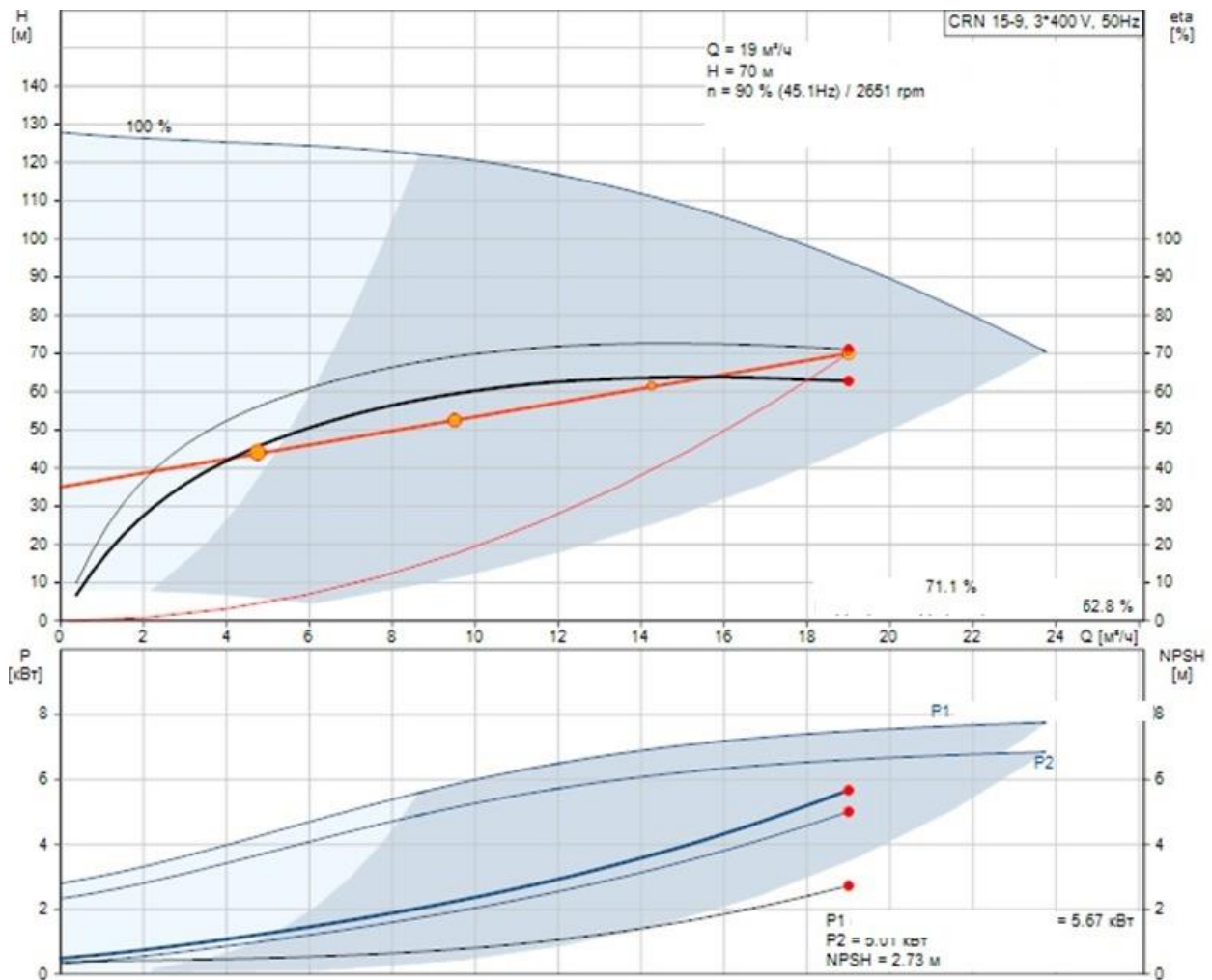


Рисунок 3.1. Робочі характеристики насоса серії CRN [11]

### Технічні дані насоса CRN 15-9:

- Максимальний напір – 127 м;
- Поточний розрахований тиск – 70 м;
- Поточна розрахована витрата – 19 м<sup>3</sup>/год;
- Ступені – 9 шт;

Матеріали:

- Основа – нержавіюча сталь (AISI 316);
- Робоче колесо – нержавіюча сталь (AISI 316).

Рідина:

- Допустимий діапазон температур від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+120^{\circ}\text{C}$ .

Монтаж:

- Максимальний робочий тиск – 25 бар;
- Розмір всмоктуючого патрубку – DN50;
- Розмір напірного патрубку – DN50.

Дані електроустаткування:

- Тип електродвигуна – 132SB;
- Клас енергоефективності – IE3;
- Енергія, потрібна для насоса – 7,5 кВт.

Вертикальний багатоступінчастий відцентровий насос із всмоктуючим та напірним патрубками, розташованими на одному рівні, що забезпечує можливість встановлення в горизонтальній однотрубній системі. Частина насоса, що контактує з рідиною, виготовлені з високоякісної нержавіючої сталі. Картридне ущільнення валу забезпечує високу надійність, безпечне використання та легкий доступ для обслуговування. Обертання передається через роз'ємну муфту. З'єднання трубопроводу здійснюється за допомогою з'єднань FlexiClamps [11].

Насос оснащений асинхронним 3-фазним електродвигуном на лапах з повітряним охолодженням.

### **Висновок до розділу 3**

За відомою витратою та напором в системі теплопостачання 70 м підбираємо насос Grundfos CRN 15-9 A-CA-A-E-HQQE

## ВИСНОВКИ

Біогаз це паливний газ, який отримується при розкладанні біологічної сировини. Це біологічна суміш, яка складається із метану (до 65%) та вуглекислого газу. У сільському господарстві біогаз можна отримати за рахунок анаеробного розпаду різних відходів основних видів діяльності сільськогосподарського підприємства та інших біологічних відходів. Відходи збирають у метантенки, де вони піддаються впливу бактерій, що виробляють метан. Процес когенерації дозволяє отримувати електроенергію та тепло від одного джерела. Когенераційна установка є міні теплоелектроцентральною, але з коефіцієнтом корисної дії від 85 відсотків до 90 відсотків. Такі установки можуть функціонувати як на традиційному джерелі (природний газ), так і на будь-якому іншому альтернативному джерелі отримання енергії (газ зі вмістом метану 50-65 відсотків), що робить їх універсальними.

За розрахованими параметрами вибираємо когенераційну установку TEDOM Quanto D1600 з максимальною електричною потужністю 1560 кВт та максимальною тепловою потужністю 1584кВт. Тип генератора МЖН 560 LA4. Вона також включає охолоджувач двигуна – теплообмінний апарат і відцентровий насос з приводом від електродвигуна. За знайденими з балансів теплообмінників витратам та температур води, вибираємо пластинчастий теплообмінник - ET-041c-10-277.

За відомою витратою та напором в системі тепlopостачання 70 м підбираємо насос Grundfos CRN 15-9 A-CA-A-E-HQQE.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Альтернативна енергетика: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів / [М. Д. Мельничук, В. О. Дубровін, В. Г. Мироненко, І. П. Григорюк, В. М. Поліщук, Г. А. Голуб, В. С. Таргоня, С. В. Драгнєв, І. В. Свистунова, С. М. Кухарець]. – К.: Аграр Медіа Груп, 2011. – 612 с.
2. Кузьменко М. Фермерський біогаз / М. Кузьменко, Г. Голуб, С. Кухарець // The Ukrainian Farmer. 2016. №7. С. 70-71.
3. Біогаз. Модуль. / В.А.Дубровін, Г.А.Голуб, В.М.Поліщук, К.М.Сера, О.А.Марус, С.В.Драгнєв, М.Ю.Павленко, В.В.Чуба, С.М.Кухарець]. – UNIDO, 2015. – 48 с.
4. Скидан О.В., Голуб Г.А., Кухарець С.М. Ярош О.Д., Чуба В.В., Медведський О.В., Цивенкова Н.М., Соколовський О.Ф., Кухарець В.В. Відновлювана енергетика в аграрному виробництві. За ред. О.В. Скидна і Г.А. Голуба. Київ, НУБіП України. 2018. 338 с.
5. Біоенергетичні системи в аграрному виробництві: навчальний посібник / [Голуб Г.А., Кухарець С.М. Марус О.А. та ін.]; за ред. Г.А. Голуба. К.: НУБіП України, 2017. – 229 с.
6. Біогаз на основі возобновляемого сырьѐа. Сравнительный анализ шестидесяти одной установки по производству биогаза в Германии / [Геммеке Бурга, Крисста Ригер, Войланд Петер и др.]. – Гюльцов: FNR, 2010. – 118 с.
7. Голуб Г.А. Управління технологічними процесами у тваринництві: навч. посіб. / Г.А. Голуб - К., НУБіП України, 2016. - 148 с.
8. Голуб Г.А. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок / [Голуб Г., Войтенко В., Рубан Б, Єрмоленко В.]: Техніка і технології АПК. – 2012. – № 2 (29). – С. 18–21.

9. <https://dizelnye-generatory.com/gazoporshnevye-elektrostrantsii/tedom-quanto-d1600-1560-kvt/>
10. [https://opeks.energy/ua/plastinchasti-teploobminniki/?gclid=Cj0KCQiA2NaNBhDvARIsAEw55hg3lGknLiFfmZB0rvWXoktIllwL02Peb9FOLN7Wwy46pWTW7t11g0caAgfuEALw\\_wcB](https://opeks.energy/ua/plastinchasti-teploobminniki/?gclid=Cj0KCQiA2NaNBhDvARIsAEw55hg3lGknLiFfmZB0rvWXoktIllwL02Peb9FOLN7Wwy46pWTW7t11g0caAgfuEALw_wcB)
11. <https://product-selection.grundfos.com/products/cr-cre-cri-crie-crn-crne-crt-crte/crn/crn-15-9-96504061?tab=variant-curves>