

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програма експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є доповнення і перевірка правильності математичної моделі руху молокоповітряної суміші по молокопровідній лінії доїльної установки та визначення оптимальних режимних параметрів ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки із системою його сервоконтролю.

У відповідності із програмою цих досліджень було потрібно:

- дослідити процес переміщення молокоповітряної суміші в доїльних апаратах одночасної та попарної дії при підключенні їх до верхнього та нижнього молокопроводів;
- провести дослідження режимних параметрів розробленого ротаційного пластинчастого вакуумного насоса із системою його сервоконтролю.

3.2 Методика експериментальних досліджень процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті

Перелік параметрів і характеристик доїльних установок, які підлягають контролю і регулюванню, регламентуються міжнародними стандартами ISO 5707 [104] і ISO 6690 [105]. В зазначених стандартах передбачені методи оцінки функціонування молочних та вакуумних систем молочно-доїльних машин, які реалізується в процесі доїння. Однак немає єдиної загальної методики експериментальних досліджень процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті.

Для реалізації методики експериментальних досліджень створено експериментальний стенд доїльної установки, який відповідає вимогам ISO 5707 [104] і має точки для підключення реєструючої апаратури згідно з ISO 3918 [103] (рисунок 3.1.). На створеному стенді є можливість імітувати технологічний процес доїння на доїльних апаратах одночасної та попарної дії при підк-

лючені їх до верхнього (рисунок 3.1-3.2) та нижнього (рисунок 3.3-3.4) молокопроводів.

Основними елементами, які були задіяні під час досліджень, були доїльні апарати одночасної і попарної дії (доїльні стакани, колектор, пульсатор, молочний і вакуумний шланги), фотокамера, осцилограф, до якого підключені датчики вакуумметричного тиску (рисунок 3.5).

Об'єктами досліджень є двотактний доїльний апарат одночасної дії «Майга» і доїльний апарат попарного доїння Milk-Rite. На обох доїльних апаратах є можливість регулювати частоту і фази пульсацій.

Дослідження процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті проводяться за наступними факторами: робочий тиск вакуумної системи P , кПа, частота пульсацій ζ , хв.⁻¹, швидкість виведення молока Q_M , л/хв.

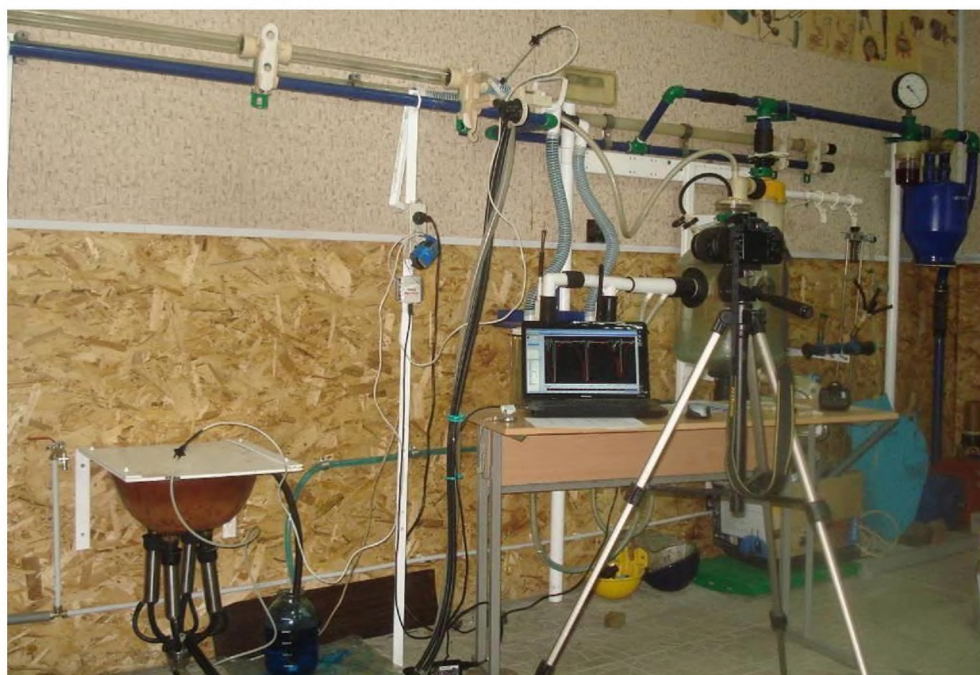


Рисунок 3.1 – Загальний вид експериментального стенду доїльної установки із доїльним апаратом одночасної дії при підключенні його до верхнього молокопроводу



Рисунок 3.2 – Загальний вид експериментального стану доїльної установки із доїльним апаратом попарної дії при підключенні його до верхнього молокопроводу



Рисунок 3.3 – Загальний вид експериментального стану доїльної установки із доїльним апаратом одночасної дії при підключенні його до нижнього молокопроводу



Рисунок 3.4 – Загальний вид експериментального стенду доїльної установки із доїльним апаратом попарної дії при підключенні його до нижнього молокопроводу

Робочий тиск вакуумної системи регулювався вакуумрегулятором. Частота пульсацій регулювалася за допомогою регулятора на пульсаторі. Процес молоковіддачі імітується на штучному вимені. Швидкість виведення молока з вимені змінювалася з використанням каліброваних жиклерів.

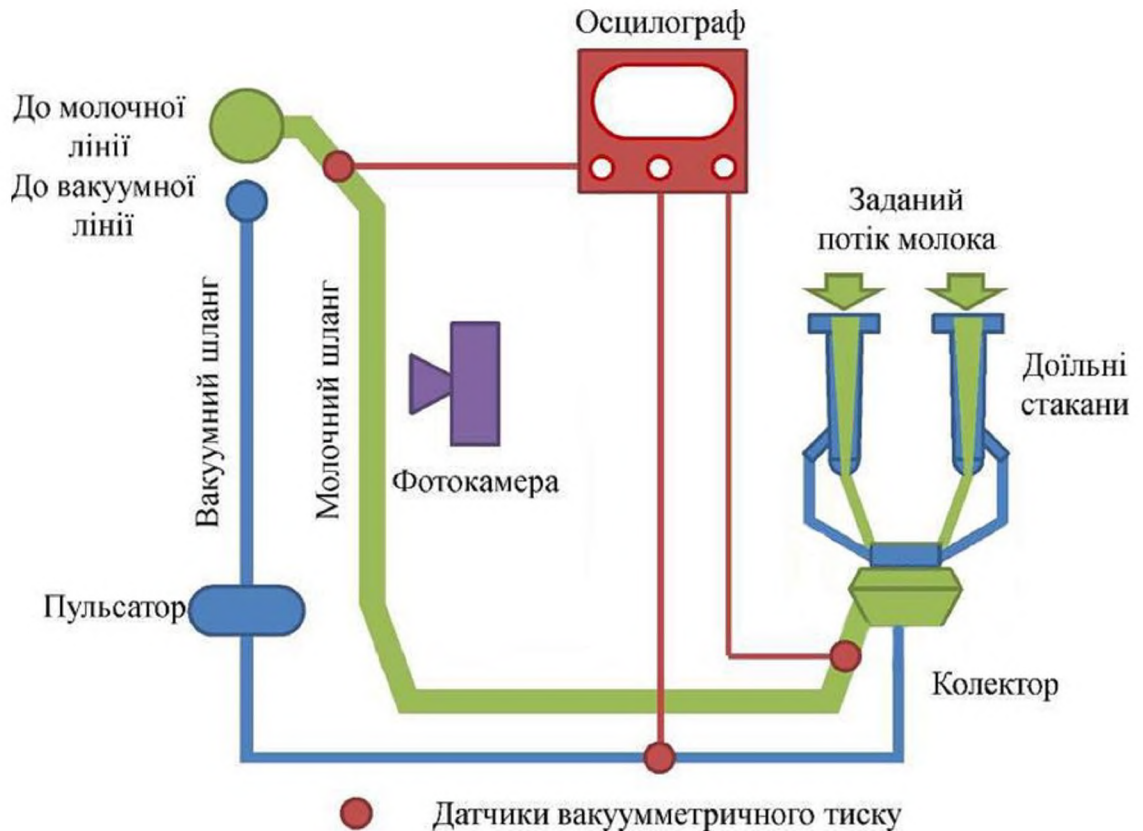


Рисунок 3.5 – Схема підключення реєструючої апаратури до доїльного апарата

Умовами проведення досліджень були: діаметр молочного шланга – 14 мм; довжина молочного шланга – 2,5 м; висота верхнього молокопроводу по відношенню до підвісної частини доїльного апарата – 1,4 м; висота нижнього молокопроводу по відношенню до підвісної частини доїльного апарата – 1,0 м.

Критеріями оцінки досліджень є флуктуація вакууму ΔP , кПа, режим течії молочно-повітряної суміші і продуктивність доїльного апарата q , л/хв.

Динаміка вакуумметричного тиску вимірюється з використанням датчика тиску MPX5100DP і фіксувалася цифровим осцилографом, який реалізовано на основі аналого-цифрового перетворювача NI USB-6008 і персонального комп'ютера із програмним пакетом NI SignalExpress 2012.

Флуктуація вакууму розраховується як середнє квадратичне відхилення вакуумметричного тиску:

$$\Delta P = \sqrt{\frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (P_i - P_{\text{сссе}})^2}, \quad (3.1)$$

де P_i – значення вакуумметричного тиску, Па;

$P_{\text{ср}}$ – середнє значення вакуумметричного тиску, Па;

j – кількість вимірів.

Продуктивність доїльного апарату – є відношення об'єму рідини, що пройшло крізь нього за одиницю часу:

$$q = \frac{V_c}{t_c}, \quad (3.2)$$

де V_c – об'єм рідини, що пройшов крізь доїльний апарат, м³;

t_c – час за який пройшов об'єм рідини V_c , с.

Об'єм рідини, що пройшов крізь доїльний апарат, визначався за допомогою вимірювальної ємності, а час – за допомогою секундоміра СОПр-2а-3-000.

Режим течії молочно-повітряної суміші визначався візуально з використанням фотокамери Nikon D3100 у режимі відеозйомки. Градування режимів течії молочно-повітряної суміші за James P. Brill [129] є наступною: переривчаста, розподільна, роздільна і перехідна течії.

Для якісного аналізу вакуумного режиму доїльного апарату для загального процесу і його машинної і біологічної складовими необхідно визначати час перебування вакуумметричного тиску в заданому полі допуску. Весь інтервал варіювання вакуумметричного тиску можна розбити на п'ять діапазонів 0-33 кПа, 33-40 кПа, 40-45 кПа, 45-55 кПа, 55 кПа і більше [157].

0-33 кПа – відповідає величині вакуумметричного тиску недостатнього для вивода молока з вимені тварини, тому в інтервалі часу з даним тиском настає гальмування рефлексу молоковіддачі у тварини, що активно припустило молоко.

33-40 кПа – біологічно достатній вакуумметричний тиск тільки для виводу молока з вимені з урахуванням всього різноманіття біологічних особливостей тварини.

40-45 кПа – необхідний для виводу молока і забезпечення підйому молочно-повітряної суміші з молочної камери колектора в молокопровід, середня величина діапазону відповідає оптимальному значенню вакуумметричного тиску із умови відсутності наповзання доїльних стаканів.

45-55 кПа – рекомендований інтервал вакуумметричного тиску для молокопроводів із верхнім розміщенням.

55 кПа і більше – перевищення допустимих меж, робота доїльних апаратів в даному діапазоні призводить до травм і захворювань молочної залози.

Дослідження проводяться за D-оптимальним планом Бокса-Бенкіна другого порядку для 3 факторів [158, 159, 160]. Матриця плану, фактори експерименту та їх рівні представлено в таблицях 3.1-3.2. Рівні варіацій факторів були обрані за результатами чисельного моделювання процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті. Досліди проводяться із триразовою повторністю.

Таблиця 3.1 – Рівні варіацій факторами експериментальних досліджень

| Рівні варіацій факторів | Фактори | | |
|----------------------------|---|--|--|
| | Швидкість виведення молока Q_M , л/хв. | Частота пульсацій ζ , хв. ⁻¹ | Робочий вакууметричний тиск вакуумної системи P, кПа |
| | x_1 | x_2 | x_3 |
| Верхній рівень (+) | 2,0 | 80 | 55 |
| Основний рівень (0) | 1,2 | 60 | 50 |
| Нижній рівень (-) | 0,4 | 40 | 45 |
| Інтервал варіацій факторів | 0,8 | 20 | 5 |

Таблиця 3.2 – Матриця плану експериментальних досліджень

| № | x_1 | x_2 | x_3 | № | x_1 | x_2 | x_3 | № | x_1 | x_2 | x_3 |
|---|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 6 | 0 | 0 | -1 | 11 | -1 | 0 | 0 |
| 2 | -1 | 1 | 0 | 7 | 0 | 0 | 1 | 12 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | -1 | 0 | 8 | 0 | 0 | -1 | 13 | -1 | 0 | 0 |
| 4 | -1 | -1 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 14 | 0 | 1 | 1 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 10 | 1 | 0 | 0 | 15 | 0 | -1 | 1 |

3.3 Методика експериментальних досліджень розробленого ротаційного пластинчатого вакуумного насоса

Експериментальні дослідження проводилися на створеному за технологічною схемою (рисунок 3.6, а) експериментальному стенді (рисунок 3.6, б), що складався з асинхронного електродвигуна, експериментального зразка ротаційного пластинчатого вакуумного насоса НВ-1200, глушника, частотного регулятора Danfoss VLT MicroDrive, регулятора витрат повітря, датчика тиску MPX5100D, датчика витрат повітря BOSCH 0 280 218 037, осцилографа RIGOL DS1022C і персонального комп'ютера.

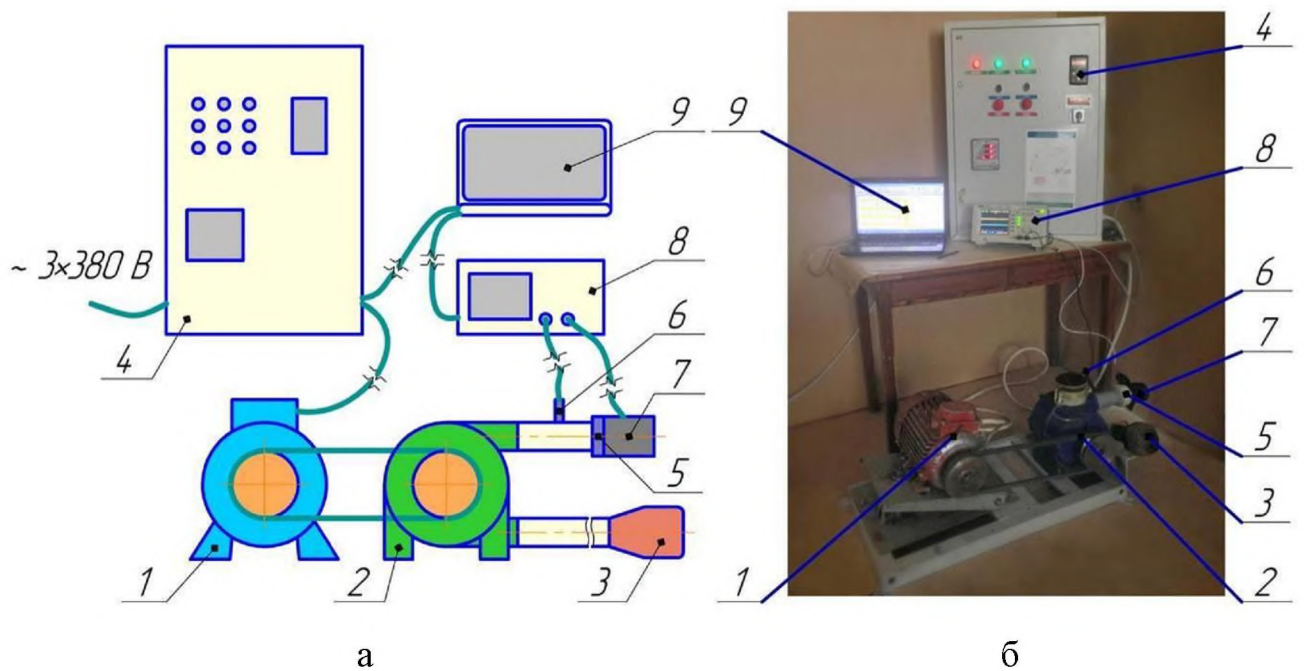


Рисунок 3.6 – Схема(а) та загальний вигляд (б) експериментального стенду для досліджень розробленого вакуумного насоса HB-1200: 1 – асинхронний електродвигун; 2 – експериментальний зразок ротаційного пластинчатого вакуумного насоса HB-1200; 3 – глушник; 4 – частотний регулятор Danfoss VLT MicroDrive; 5 – регулятор витрат повітря; 6 – датчик тиску MPX5100D; 7 – датчик витрат повітря BOSCH 0 280 218 037; 8 – осцилограф RIGOL DS1022C; 9 – персональний комп'ютер

Для керування та зміни частоти обертання ротору вакуумного насоса використовувався перетворювач частоти електричного струму Danfoss VLT MicroDrive.

Величину вакуумметричного тиску встановлювали за допомогою регулятора витрат повітря (змінюючи площу впускного отвору S , мм²) і контролювали з використанням датчика тиску MPX5100D.

Продуктивність насоса вимірювали з використанням датчика витрат повітря BOSCH 0 280 218 037.

Споживану потужність приводу вакуумного насоса вимірювали на Danfoss VLT MicroDrive.

Дані з датчиків тиску MPX5100D та витрат повітря BOSCH 0 280 218 037 фіксувалися на осцилографі RIGOL DS1022C і передавалися на персональний комп'ютер.

Дослідження з визначення залежностей впливу технічних параметрів вакуумного насоса на ефективність його експлуатації проводились із застосуванням методу математичного планування багатofакторного експерименту.

Дослідження впливу режимних параметрів ротаційного пластинчатого вакуумного насоса на ефективність його експлуатації проводились за двома факторами: частота обертання ротору n , об/хв. і величина вакуумметричного тиску P , кПа.

Критеріями оцінки досліджень були продуктивність вакуумного насоса Q_a , м³/год, споживана потужність приводу вакуумного насоса N_p , кВт і флуктуація вакууму ΔP , кПа.

Межі варіацій факторів були обрані з теоретичних досліджень конструкційно-технологічних параметрів ротаційного пластинчатого вакуумного насоса і попередніх досліджень. Матриця планування приведена в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Матриця планування експерименту

| | | | | | | | |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| n , хв ⁻¹ | 600 | 1200 | 1800 | 2400 | 3000 | 600 | 1200 |
| S , мм ² | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 55 | 55 |
| № | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| n , хв ⁻¹ | 1800 | 2400 | 3000 | 600 | 1200 | 1800 | 2400 |
| S , мм ² | 55 | 55 | 55 | 118 | 118 | 118 | 118 |
| № | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| n , хв ⁻¹ | 3000 | 600 | 1200 | 1800 | 2400 | 3000 | 600 |
| S , мм ² | 118 | 181 | 181 | 181 | 181 | 181 | 243 |
| № | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
| n , хв ⁻¹ | 1200 | 1800 | 2400 | 3000 | 600 | 1200 | 1800 |
| S , мм ² | 243 | 243 | 243 | 243 | 306 | 306 | 306 |
| № | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 |
| n , хв ⁻¹ | 2400 | 3000 | 600 | 1200 | 1800 | 2400 | 3000 |
| S , мм ² | 306 | 306 | 368 | 368 | 368 | 368 | 368 |

На основі отриманих результатів необхідно розробити алгоритм системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса і перевірити його функціональність шляхом імітації процесу підключення або відключення доїльних апаратів до молочно-вакуумної системи.

На початку досліджень на регуляторі витрат повітря (рисунок 3.6) встановлюється початкове значення 400 л/хв., що відповідає витратам повітря доїльної установки із відключеними доїльними апаратами.

В процесі досліджень з інтервалом 10 с змінюється положення регулятора витрат повітря, як в сторону збільшення, так в сторону зменшення витрат повітря на величини 45 л/хв., 90 л/хв., 135 л/хв.

Критерієм оцінки ефективності функціонування алгоритму системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса є флуктуація вакууму ΔP і потужність його привода N_p .

3.4 Обробка результатів експериментальних досліджень

Математичне планування багатфакторного експерименту передбачає визначення математичних моделей процесів у вигляді рівнянь регресії (полінома) другого порядку [161, 162, 163]

$$y = a_0 + \sum_{k=1}^k a_k x_k + \sum_{k=1}^k a_{ij} x_i x_j + \sum_{k=1}^k a_{ii} x_i^2, \quad (3.3)$$

де a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} – коефіцієнти регресії;

x_i, x_j – незалежні змінні фактори.

Рівняння регресії другого порядку визначаються у кодованому вигляді. Кодування факторів здійснюється за формулою:

$$x_i = \frac{A_i - A_{oi}}{\varepsilon}, \quad (3.4)$$

де x_i – кодоване значення фактора (безрозмірна величина, рівні: верхній, нижній і в центрі позначаються відповідно +1; -1; 0);

A_i – натуральне значення фактора;

A_{oi} – натуральне значення фактора на нульовому рівні;

ε – натуральне значення інтервалу варіації фактора.

Обробка результатів досліджень, проведених методом математичного факторного планування експериментів [164], виконувались за допомогою комп'ютерної програми «Mathematica» [165, 166].

Відтворення дослідів визначається по однорідності результатів вимірювань. Умови однорідності формалізуються так, щоб усі вимірювання, які входять у дану сукупність, могли виглядати як значення однієї випадкової величини, підпорядкованої нормальному розподілу.

Умови однорідності дослідів припускають приблизно однаковий вплив помилок за усіма точками у плані дослідів. Для перевірки відтворення дослідів, які виконувалися у трьохкратній повторності, використовують критерій Кохрена. Це відношення максимальної дисперсії до суми усіх дисперсій:

$$G_p = \frac{\sigma_i^2 \max}{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}, \quad (3.5)$$

де $\sigma_i^2 \max$ – найбільша порядкова дисперсія;

$\sum_{i=1}^N \sigma_i^2$ – сума порядкових дисперсій.

Дисперсія обчислюється по формулі:

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_{i_u} - \bar{y}_u)^2}{o - 1}, \quad (3.6)$$

де y_{i_u} – значення критерію оптимізації в u -му досліді по i -й повторюваності;

\bar{y}_u – середнє значення критерію оптимізації в u -му досліді;

o – кількість повторів у досліді.

Обчислюване значення дисперсії порівнюється з табличним, при чому дисперсії вважаються однорідними при умові $\sigma_p \leq \sigma_{\text{табл.}}$. При $\sigma_p > \sigma_{\text{табл.}}$ необхідно підвищити точність вимірів, або установити менші інтервали варіації факторів та збільшити кількість повторів у дослідах.

Табличне значення дисперсії визначається для 95 % рівня довірчої вірогідності та ступені свободи: $\chi = \alpha - 1$.

При визначенні похибки результатів дослідів враховується, що відхилення від середнього арифметичного значення не повинно перевищувати межі помилки $\pm 3\sigma$ (σ – середньоквадратичне відхилення). Тому відхилення, яке перевищує по своєму значенню $\pm 3\sigma$, показує, що його треба виключити з розгляду [167, 168, 169, 170, 171, 172].

Довірчі межі випадкової похибки результатів вимірювань обчислюються за критерієм Стьюдента:

$$\tau = t \cdot \sigma_{x_i}, \quad (3.7)$$

де t – коефіцієнт Стьюдента для довірчої вірогідності p (ГОСТ 8.207-76 [173, 174]);

σ_{x_i} – середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань.

Більш грубі помилки вимірювань визначаються з наступного виразу:

$$\frac{x_{n+1} - \bar{x}}{\sigma_i} \geq t, \quad (3.8)$$

де x_{n+1} – сумнівне значення показника;

\bar{x} – середньоарифметичне значення вимірюваного показника;

σ_i – середньоквадратичне відхилення результату вимірювань.

Коефіцієнт варіації визначається за формулою:

$$K_V = (\sigma_i / X_{cp}) \cdot 100\%. \quad (3.9)$$

Середньоквадратичне відхилення дорівнює:

$$\sigma_i = \left[\left[\sum_{i=1}^m (x_i - x_{cp})^2 \right] / (m - 1) \right]^{0.5}. \quad (3.10)$$

Середньоарифметичне значення вимірюваної величини:

$$x_{cp} = (\sum x_i) / o, \quad (3.11)$$

де x_i – значення вимірюваної величини.

Абсолютна похибка середнього арифметичного значення відхилення визначається за формулою:

$$\Delta = \pm 3 \sigma_i. \quad (3.12)$$

Похибка дослідження розраховується за виразом:

$$\Pi = \pm 3 \sigma_i / x_{cp} \cdot 100\%. \quad (3.13)$$

З метою перевірки гіпотези на адекватність моделі другого порядку проводиться статистичний аналіз рівнянь регресії.

Адекватність моделі перевіряється за допомогою критерію Фішера:

$$F_p = \frac{S_{LF}^2}{S_y^2}, \quad (3.14)$$

де S_{LF}^2 – дисперсія неадекватності математичної моделі;

S_y^2 – дисперсія помилки дослідження.

Для адекватності моделі повинна виконуватись умова $F_p \leq F_{табл.}$

Значимість коефіцієнтів регресії перевіряється за допомогою визначення довірчого інтервалу для коефіцієнтів регресії. Коефіцієнт регресії враховується значимим, якщо його абсолютне значення перевищує величину довірчого інтервалу Δa_i , який визначається за формулою:

$$\pm \Delta a_i = \pm k_t S_{bi}, \quad (3.15)$$

де S_{bi} – квадратична похибка коефіцієнта регресії;

k_t – табличне значення t-критерію при числі ступенів свободи для S_y^2 .

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_y^2}{N_n}}, \quad (3.16)$$

де N_n – кількість дослідів.

Якщо коефіцієнти значимі, це означає, що дія одного з них залежить від рівня, на якому знаходиться інший фактор. Якщо він має позитивний знак, то величина критерію оптимізації підвищується, тобто обидва фактори одночасно знаходяться на верхніх рівнях (або на нижніх). Якщо коефіцієнт має негативний знак, тоді підвищенню критерію оптимізації сприяють сполучення факторів на різних рівнях.

Фізичне значення коефіцієнта a_{ij} полягає в кількісній зміні параметру оптимізації при зміні фактора на величину одного інтервалу варіювання (при закодованих факторах) або на одиницю вимірювання фактора (при розкодованих значеннях).

Знак плюс або мінус перед a_i показує на збільшення або зменшення критерію оптимізації. Коефіцієнт a_0 має приблизно середнє значення критерію оптимізації.

Після отримання математичної моделі процесу визначаються оптимальні значення факторів (координати оптимуму поверхні відгуку) та вивчаються властивості цієї поверхні біля оптимуму. Пошук оптимуму ведеться методом канонічного перетворення математичної моделі у форму наступного вигляду:

$$y - y_s = a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2 + \dots + a_{kk} X_k^2, \quad (3.17)$$

де y_s – значення критерію оптимізації у оптимальній точці;

X_1, X_2, \dots, X_k – нові осі координат, повернуті відносно старих x_1, x_2, \dots, x_k ;

$b_{11}, b_{22}, \dots, b_{kk}$ – коефіцієнти регресії у канонічній формі.

Канонічне перетворення моделі виконується за встановленою методикою. Результатом перетворення рівняння регресії є форма поверхні відгуку та оптимальні координати поверхні відгуку або оптимальні значення факторів процесу роботи вакуумного насоса. Після цього проводять аналіз поверхні відгуку за допомогою двомірних перетинів. Побудування двомірних перетинів виконуються з використанням програмного пакету «Mathematica».

Пошук оптимуму ведеться рішенням компромісної задачі, після визначення математичних моделей процесу за оцінювальними показниками та визначення оптимальних параметрів. На початку виділяються найбільш значимі фактори по кожній моделі та їх оптимальні параметри, потім із загального списку визначаються спільні фактори і аналізується діапазон їхніх оптимальних значень.