

$b_{11}, b_{22}, \dots, b_{kk}$  – 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.

## РОЗДІЛ 4

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 4.1 Результати експериментальних досліджень процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті

Відповідно до розробленої методики експериментальних досліджень процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті для кожного дослідження отримано динаміку вакуумметричного тиску у трьох точках доїльного апарата: пульсаторі, колекторі і молочному крані. Графіки динаміки вакуумметричного тиску для двох варіантів розташування молокопроводу із доїльними апаратами одночасного та попарного доїння представлені в додатках Д-3.

Згідно результатів досліджень (додаток Д) було створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на флуктуацію вакуумметричного тиску для *верхнього молокопроводу із доїльним апаратом одночасної дії*, яку можна представити у закодованому вигляді:

$$y_{\text{ивмод}} = 2,6 + 0,6125 x_1 - 0,0675 x_1^2 + 0,56375 x_2 - 0,1625 x_1 x_2 + 0,24 x_2^2 + 0,23625 x_3 + 0,3575 x_1 x_3 + 0,045 x_2 x_3 + 0,065 x_3^2. \quad (4.1)$$

Для цього рівняння на 95% рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена  $G = 0,1463 < G_{0,05}(2, 15) = 0,3346$

Дисперсія адекватності математичної моделі  $S_{\text{ад}}^2 = 0,0929$ ; дисперсія похибки дослідів  $S_y^2 = 0,0444$ ; значення критерію Фішера  $F = 2,09 < F_{0,05}(8, 30) = 2,27$ ; модель адекватна на будь-якому рівні довірчої ймовірності.

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стюдента  $t_{0,05}(30) = 2,04$  рівняння регресії (4.1) прийме вигляд

$$y_{\text{ивмод}} = 2,6 + 0,6125 x_1 + 0,56375 x_2 - 0,1625 x_1 x_2 + 0,24 x_2^2 + 0,23625 x_3 + 0,3575 x_1 x_3. \quad (4.2)$$

У розкодованому вигляді модель (4.2) має вигляд

$$\Delta P_{\text{ВМОД}} = 4,41875 - 0,031625 \zeta + 0,0006 \zeta^2 - 3,09375 Q_M - 0,0101563 Q_M \zeta + 0,089375 Q_M P - 0,06 P \quad (4.3)$$

де  $\Delta P$  – флуктуація вакуумметричного тиску, кПа;

$Q_M$  – швидкість виведення молока, л/хв;

$\zeta$  – частота пульсацій, хв<sup>-1</sup>;

$P$  – робочий тиск вакуумної системи, кПа.

Аналізуючи рівняння (4.3), можна стверджувати, що на флуктуацію вакуумметричного тиску для верхнього молокопроводу із доїльним апаратам одночасної дії впливають всі вищезгадані фактори (рисунок 4.1). При цьому зі збільшенням швидкості виведення молока, частоти пульсацій доїльного апарата і робочого тиску вакуумної системи збільшується і флуктуація вакуумметричного тиску.

Також для варіанту з верхнім молокопроводом із доїльним апаратом одночасної дії створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на продуктивність доїльного апарата, яку можна представити у закодованому вигляді:

$$y_{\text{2ВМОД}} = 1,21 + 0,771875 x_1 + 0,091875 x_1^2 - 0,03 x_2 - 0,0625 x_1 x_2 - 0,129375 x_2^2 + 0,124375 x_3 + 0,15375 x_1 x_3 + 0,0175 x_2 x_3 - 0,138125 x_3^2. \quad (4.4)$$

Для цього рівняння на 95% рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена  $G = 0,1575 < G_{0,05}(2, 15) = 0,3346$ .

Дисперсія адекватності математичної моделі  $S_{\text{ад}}^2 = 0,0257$ ; дисперсія похибки дослідів  $S_y^2 = 0,0124$ ; значення критерію Фішера  $F = 2,07 < F_{0,05}(8, 30) = 2,27$ ; модель адекватна на будь-якому рівні довірчої ймовірності.

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стьюдента  $t_{0,05}(30) = 2,04$  рівняння регресії (4.4) прийме вигляд

$$y_{2\text{ВМОД}} = 1,21 + 0,771875x_1 + 0,091875x_1^2 - 0,129375x_2^2 + 0,124375x_3 + 0,15375x_1x_3 - 0,138125x_3^2. \quad (4.5)$$

У розкодованому вигляді модель (4.5) має вигляд

$$q_{\text{ВМОД}} = -13,6555 + 0,143555Q_M^2 + 0,0388125\zeta - 0,000323438\zeta^2 - 1,30156Q_M + 0,0384375Q_M P + 0,53125P - 0,005525P^2, \quad (4.6)$$

де  $q$  – продуктивність доїльного апарату, л/хв.

Аналізуючи рівняння (4.6), можна стверджувати, що на продуктивність доїльного апарату одночасної дії для верхнього молокопроводу впливають всі вищезгадані фактори (рисунок 4.1). При цьому зі збільшенням швидкості виведення молока і вакуумметричного тиску збільшується і продуктивність доїльного апарату, а при варіюванні значень частоти пульсацій доїльного апарату продуктивність доїльного апарату має оптимум:

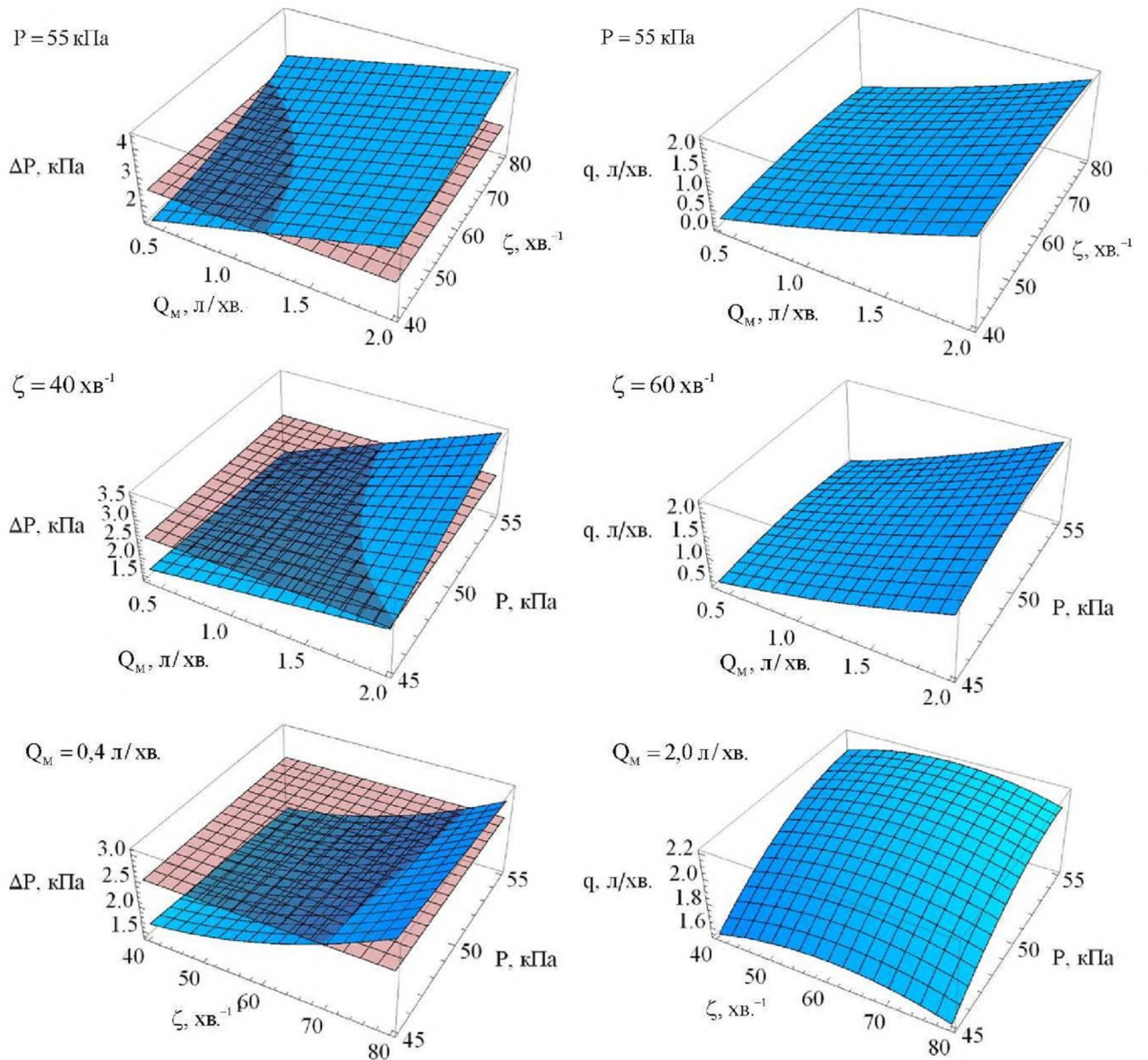
$$q_{\text{ВМОД}}(Q_M = 2,0 \text{ л/хв.}; \zeta = 60 \text{ хв}^{-1}; P = 55 \text{ кПа}) = 2,21 \text{ л/хв.} \quad (4.7)$$

Згідно проведеного аналізу зоотехнічних вимог (розділ 1) флуктуація вакуумметричного тиску не повинна перевищувати 2,5 кПа, при цьому продуктивність доїльного апарату повинна бути максимальною, тому для отримання оптимальних значень факторів необхідно розв'язати систему рівнянь і нерівностей

$$\begin{cases} \Delta P(Q_M, \zeta, P) < 2,5, \\ q(Q_M, \zeta, P) \rightarrow \max \\ 0,4 < Q_M < 2,0. \end{cases} \quad (4.8)$$

Рішенням системи рівнянь і нерівностей (4.3), (4.6), (4.8) для варіанту з верхнім молокопроводом із доїльним апаратам одночасної дії є залежності частоти пульсацій і робочого тиску вакуумної системи від швидкості виведення молока, графічна інтерпретація яких представлена на рисунку 4.2.





Зоотехнічні вимоги щодо флуктуації вакуумметричного тиску, які не повинні перевищувати 2,5 кПа відмічені червоною площиною

Рисунок 4.1 – Вплив швидкості виведення молока  $Q_M$ , частоти пульсацій  $\zeta$  і робочого тиску вакуумної системи  $P$  на флуктуацію вакуумметричного тиску  $\Delta P$  і продуктивність доїльного апарата  $q$  одночасної дії для верхнього молокопроводу

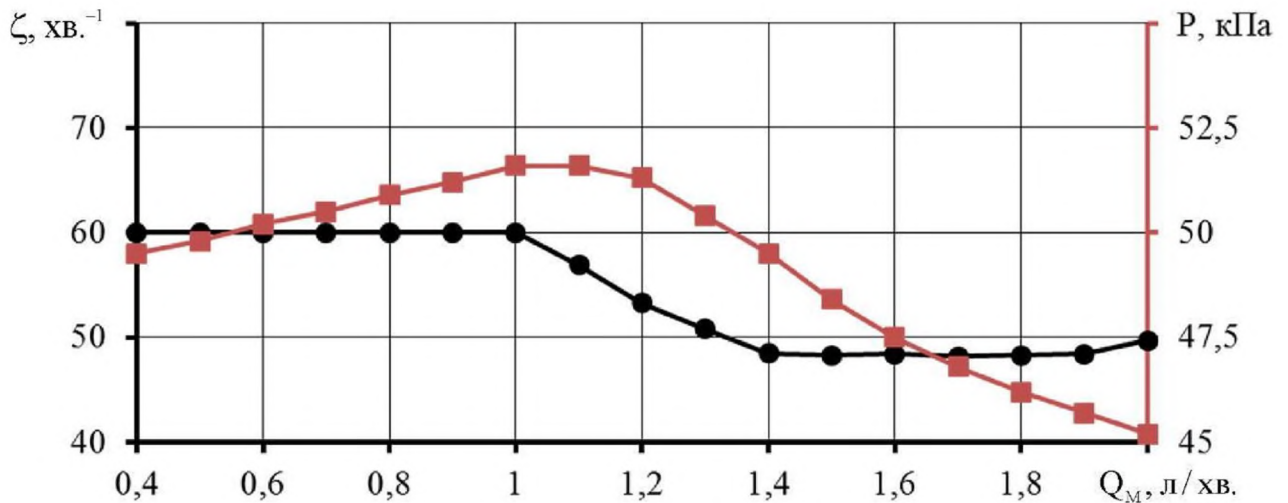


Рисунок 4.2 – Залежності частоти пульсацій  $\zeta$  і робочого тиску  $P$  вакуумної системи від швидкості виведення молока  $Q_M$  для варіанту з верхнім молокопроводом із доїльним апаратом одночасної дії

Згідно результатів досліджень (додаток Е) було створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на флуктуацію вакуумметричного тиску *для верхнього молокопроводу із доїльним апаратом попарної дії*, яку можна представити у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned}
 y_{1\text{ВМПД}} = & 1,40667 + 0,79125 x_1 - 0,178333 x_1^2 + 0,07125 x_2 + \\
 & + 0,055 x_1 x_2 - 0,183333 x_2^2 + 0,2275 x_3 + 0,0425 x_1 x_3 + \\
 & + 0,0975 x_2 x_3 - 0,170833 x_3^2.
 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Для цього рівняння на 95% рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена  $G = 0,2147 < G_{0,05}(2, 15) = 0,3346$

Дисперсія адекватності математичної моделі  $S_{\text{ад}}^2 = 0,1072$ ; дисперсія похибки дослідів  $S_y^2 = 0,0514$ ; значення критерію Фішера  $F = 2,08 < F_{0,05}(9, 30) = 2,21$ ; модель адекватна на будь-якому рівні довірчої ймовірності.

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стьюдента  $t_{0,05}(30) = 2,04$  рівняння регресії (4.9) прийме вигляд

$$\begin{aligned}
 y_{1\text{ВМПД}} = & 1,40667 + 0,79125 x_1 - 0,178333 x_1^2 - \\
 & - 0,183333 x_2^2 + 0,2275 x_3 - 0,170833 x_3^2.
 \end{aligned} \quad (4.10)$$

У розкодованому вигляді модель (4.10) має вигляд

$$\Delta P_{\text{ВМПД}} = -21,1898 + 1,65781 Q_M - 0,278646 Q_M^2 + 0,055 \zeta - 0,000458333 \zeta^2 + 0,728833 P - 0,00683333 P^2. \quad (4.11)$$

Аналізуючи рівняння (4.30), можна стверджувати, що на флуктуацію вакуумметричного тиску для верхнього молокопроводу із доїльним апаратам попарної дії впливають всі вищезгадані фактори (рисунок 4.3). При цьому зі збільшенням швидкості виведення молока збільшується і флуктуація вакуумметричного тиску, а частота пульсацій доїльного апарата і робочий тиск вакуумної системи не значно впливає на зазначений критерій.

Також для варіанту з верхнім молокопроводом із доїльним апаратам попарної дії створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на продуктивність доїльного апарату, яку можна представити у закодованому вигляді:

$$y_{\text{2ВМПД}} = 1,21333 + 0,805875 x_1 + 0,0549583 x_1^2 + 0,010875 x_2 - 0,05175 x_1 x_2 - 0,155042 x_2^2 + 0,075 x_3 - 1,89085 \times 10^{-16} x_1 x_3 - 0,005 x_2 x_3 - 0,0232917 x_3^2. \quad (4.12)$$

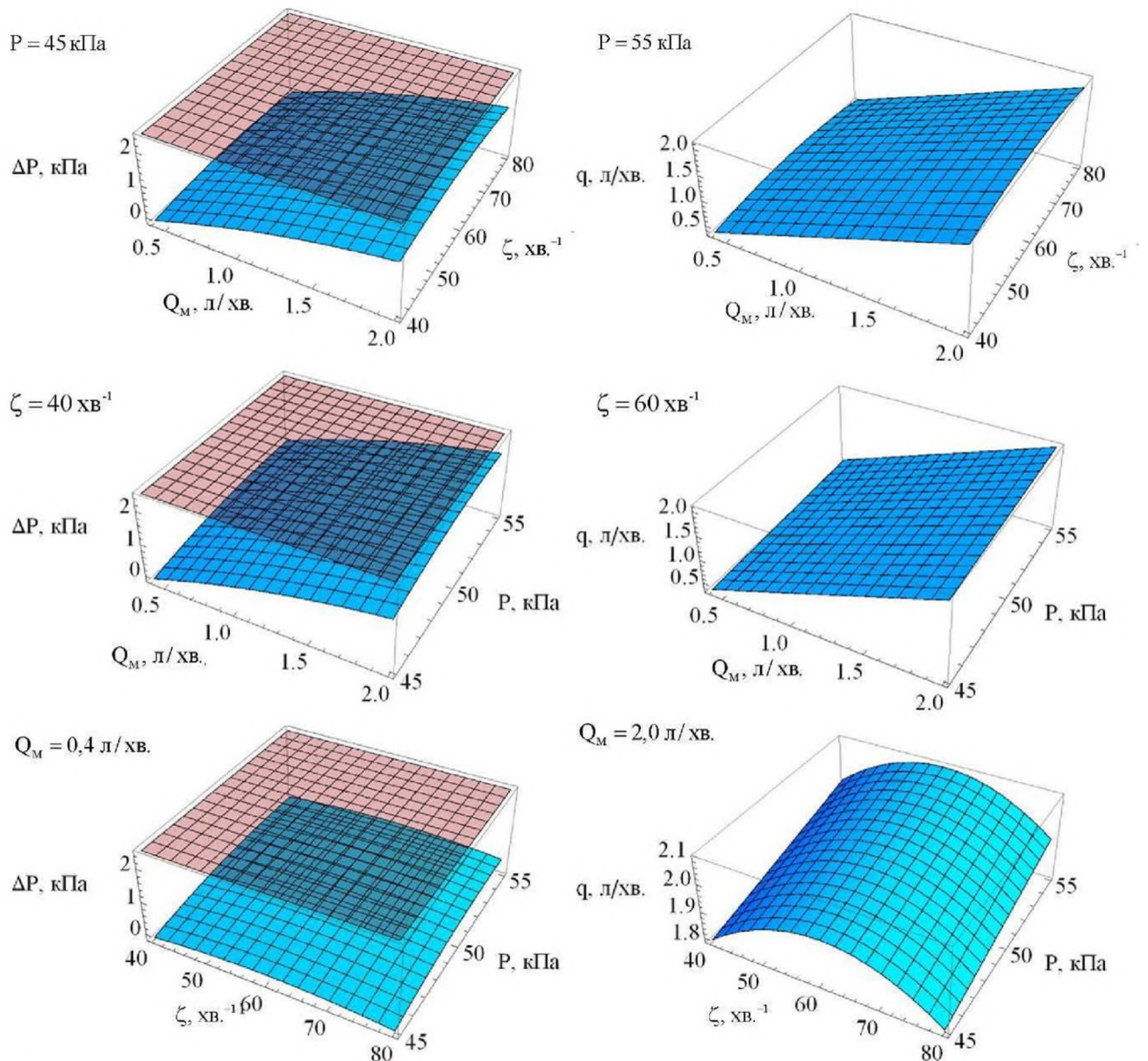
Для цього рівняння на 95% рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена  $G = 0,2686 < G_{0,05}(2, 15) = 0,3346$ .

Дисперсія адекватності математичної моделі  $S_{\text{ад}}^2 = 0,0211$ ; дисперсія похибки дослідів  $S_y^2 = 0,0112$ ; значення критерію Фішера  $F = 1,88 < F_{0,05}(11, 30) = 2,13$ ; модель адекватна на будь-якому рівні довірчої ймовірності.

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стьюдента  $t_{0,05}(30) = 2,04$  рівняння регресії (4.12) прийме вигляд

$$y_{\text{2ВМПД}} = 1,21333 + 0,805875 x_1 - 0,155042 x_2^2 + 0,075 x_3. \quad (4.13)$$





Зоотехнічні вимоги щодо флуктуації вакуумметричного тиску, які не повинні перевищувати 2,5 кПа відмічені червоною площиною

Рисунок 4.3 – Вплив швидкості виведення молока  $Q_M$ , частоти пульсацій  $\zeta$  і робочого тиску вакуумної системи  $P$  на флуктуацію вакуумметричного тиску  $\Delta P$  і продуктивність доїльного апарата  $q$  попарної дії для верхнього молокопроводу

У розкодзованому вигляді модель (4.13) має вигляд

$$q_{\text{ВМПД}} = -2,14085 + 1,00734 Q_M + 0,0465125 \zeta - 0,000387604 \zeta^2 + 0,015 P. \quad (4.14)$$

Аналізуючи рівняння (4.14), можна стверджувати, що на продуктивність доїльного апарата попарної дії для верхнього молокопроводу впливають всі вищезгадані фактори (рисунок 4.3). При цьому зі збільшенням швидкості ви-

ведення молока і вакуумметричного тиску збільшується і продуктивність доїльного апарата, а при варіюванні значень частоти пульсацій доїльного апарата продуктивність доїльного апарата має оптимум:

$$q_{\text{ВМПД}}(Q_{\text{М}} = 2,0 \text{ л/хв.}; \zeta = 60 \text{ хв}^{-1}; P = 55 \text{ кПа}) = 2,09 \text{ л/хв.} \quad (4.15)$$

Рішенням системи рівнянь і нерівностей (4.8), (4.11), (4.14) для варіанту з верхнім молокопроводом із доїльним апаратом попарної дії є частота пульсацій  $\zeta = 60 \text{ хв.}^{-1}$  і робочого тиску вакуумної системи  $P = 54,9 \text{ кПа}$ .

Згідно результатів досліджень (додаток Ж) було створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на флуктуацію вакуумметричного тиску для *нижнього молокопроводу із доїльним апаратом одночасної дії*, яку можна представити у закодованому вигляді:

$$y_{\text{ІНМОД}} = 1,13 + 0,7075 x_1 + 0,21 x_1^2 + 0,3975 x_2 + 0,285 x_1 x_2 + 0,255 x_2^2 + 0,0425 x_3 - 0,08 x_1 x_3 + 0,09 x_2 x_3 + 0,145 x_3^2. \quad (4.16)$$

Для цього рівняння на 95% рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена  $G = 0,1161 < G_{0,05}(2, 15) = 0,3346$

Дисперсія адекватності математичної моделі  $S_{\text{ад}}^2 = 0,1673$ ; дисперсія похибки дослідів  $S_y^2 = 0,0793$ ; значення критерію Фішера  $F = 2,11 < F_{0,05}(9, 30) = 2,21$ ; модель адекватна на будь-якому рівні довірчої ймовірності.

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стьюдента  $t_{0,05}(30) = 2,04$  рівняння регресії (4.16) прийме вигляд

$$y_{\text{ІНМОД}} = 1,13 + 0,7075 x_1 + 0,21 x_1^2 + 0,3975 x_2 + 0,285 x_1 x_2 + 0,255 x_2^2. \quad (4.17)$$

У розкодованому вигляді модель (4.17) має вигляд

$$\Delta P_{\text{НМОД}} = 2,92625 + 0,328125 Q_{\text{М}}^2 - 0,971875 Q_{\text{М}} + 0,0178125 Q_{\text{М}} \zeta - 0,078 \zeta + 0,0006375 \zeta^2. \quad (4.18)$$

Аналізуючи рівняння (4.18), можна стверджувати, що на флуктуацію вакуумметричного тиску для нижнього молокопроводу із доїльним апаратом одночасної дії впливають швидкість виведення молока і частота пульсацій дої-

льного апарата (рисунок 4.4). При цьому зі збільшенням швидкості виведення молока і частоти пульсацій доїльного апарата збільшується і флуктуація вакуумметричного тиску.

Також для варіанту з нижнім молокопроводом із доїльним апаратом одночасної дії створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на продуктивність доїльного апарата, яку можна представити у закодованому вигляді:

$$y_{2\text{нмод}} = 1,32667 + 0,794375x_1 + 0,103542x_1^2 - 0,10625x_2 - 0,055x_1x_2 - 0,155208x_2^2 + 0,145625x_3 + 0,20125x_1x_3 + 0,0575x_2x_3 - 0,193958x_3^2. \quad (4.19)$$

Для цього рівняння на 95% рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена  $G = 0,1842 < G_{0,05}(2, 15) = 0,3346$ .

Дисперсія адекватності математичної моделі  $S_{\text{ад}}^2 = 0,0207$ ; дисперсія похибки дослідів  $S_y^2 = 0,0110$ ; значення критерію Фішера  $F = 1,88 < F_{0,05}(7, 30) = 2,33$ ; модель адекватна на будь-якому рівні довірчої ймовірності.

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стьюдента  $t_{0,05}(30) = 2,04$  рівняння регресії (4.19) прийме вигляд

$$y_{2\text{нмод}} = 1,32667 + 0,794375x_1 + 0,103542x_1^2 - 0,10625x_2 - 0,055x_1x_2 - 0,155208x_2^2 + 0,145625x_3 + 0,20125x_1x_3 - 0,193958x_3^2. \quad (4.20)$$

У розкодованому вигляді модель (4.20) має вигляд

$$q_{\text{нмод}} = -18,5434 + 0,161784Q_M^2 + 0,04125\zeta - 0,000388021\zeta^2 - 1,91094Q_M + 0,0503125Q_M P + 0,744583P - 0,00775833P^2. \quad (4.21)$$

Аналізуючи рівняння (4.21), можна стверджувати, що на продуктивність доїльного апарата попарної дії для нижнього молокопроводу впливають всі вищезгадані фактори (рисунок 4.4). При цьому зі збільшенням швидкості виведення молока і вакуумметричного тиску збільшується і продуктивність доїльного апарата, а при варіюванні значень частоти пульсацій доїльного апарата продуктивність доїльного апарата має оптимум:

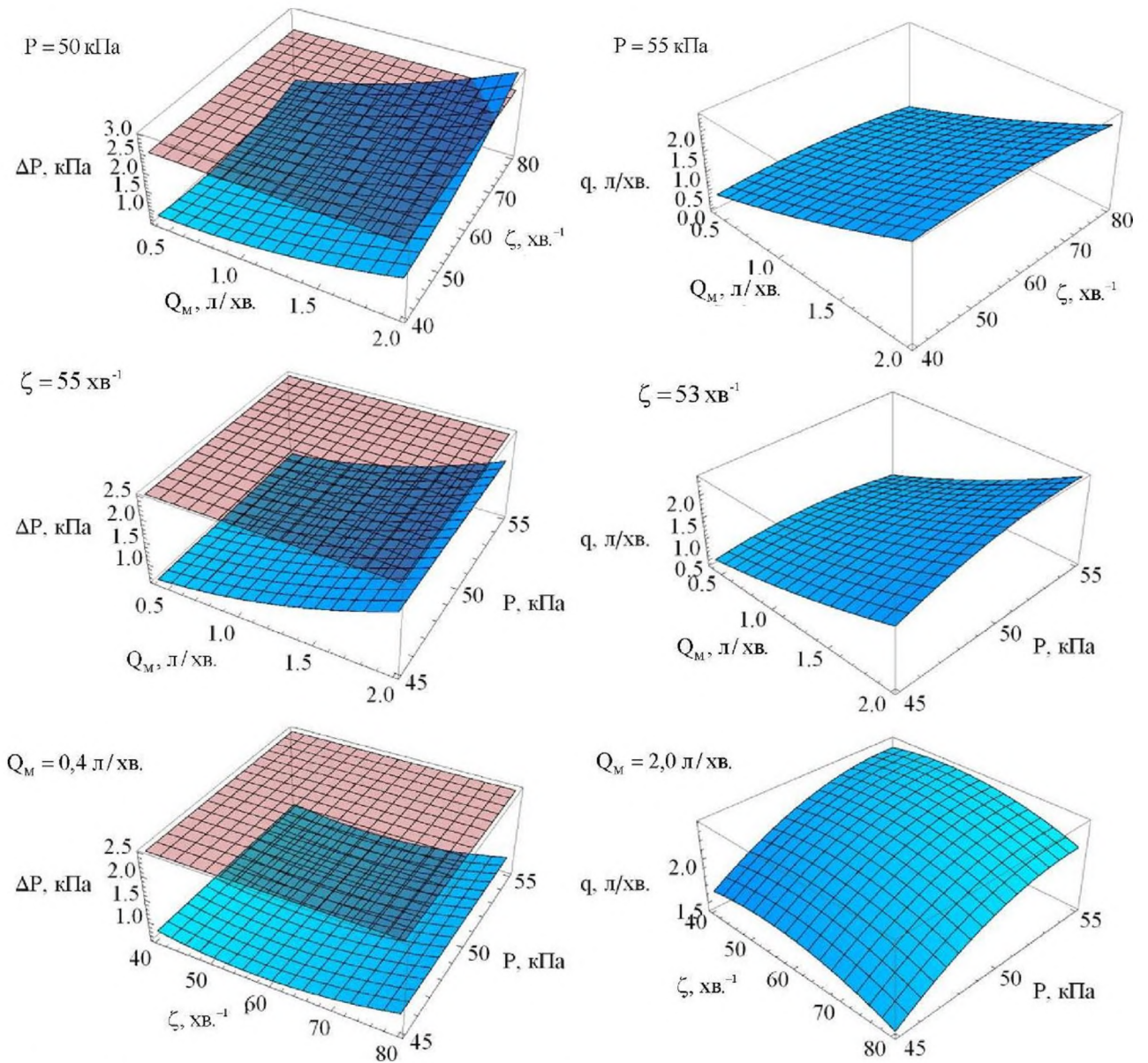


$$q_{\text{нмод}}(Q_{\text{м}} = 2,0 \text{ л/хв.}; \zeta = 53,3 \text{ хв}^{-1}; P = 55 \text{ кПа}) = 2,39 \text{ л/хв.} \quad (4.22)$$

Рішенням системи рівнянь і нерівностей (4.8), (4.18), (4.21) для варіанту з нижнім молокопроводом із доїльним апаратом одночасної дії є залежності частоти пульсацій і робочого тиску вакуумної системи від швидкості виведення молока, графічна інтерпретація яких представлена на рисунку 4.5.

Згідно результатів досліджень (додаток 3) було створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на флуктуацію вакуумметричного тиску для *нижнього молокопроводу із доїльним апаратом попарної дії*, яку можна представити у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} y_{\text{нмпд}} = & 0,6 + 0,0645833 x_1 - 0,0454167 x_1^2 - 0,0841667 x_2 - \\ & - 0,148333 x_1 x_2 + 0,00208333 x_2^2 + 0,00125 x_3 - \\ & - 0,0275 x_1 x_3 + 0,02 x_2 x_3 + 0,157917 x_3^2. \end{aligned} \quad (4.23)$$



Зоотехнічні вимоги щодо флуктуації вакуумметричного тиску, які не повинні перевищувати 2,5 кПа відмічені червоною площиною

Рисунок 4.4 – Вплив швидкості виведення молока  $Q_M$ , частоти пульсацій  $\zeta$  і робочого тиску вакуумної системи  $P$  на флуктуацію вакуумметричного тиску  $\Delta P$  і продуктивність доїльного апарата  $q$  одночасної дії для нижнього молокопроводу

Для цього рівняння на 95% рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена  $G = 0,1217 < G_{0,05}(2, 15) = 0,3346$

Дисперсія адекватності математичної моделі  $S_{ад}^2 = 0,1439$ ; дисперсія похибки дослідів  $S_y^2 = 0,1204$ ; значення критерію Фішера  $F = 1.20 < F_{0,05}(14, 30) = 2.04$ ; модель адекватна на будь-якому рівні довірчої ймовірності.

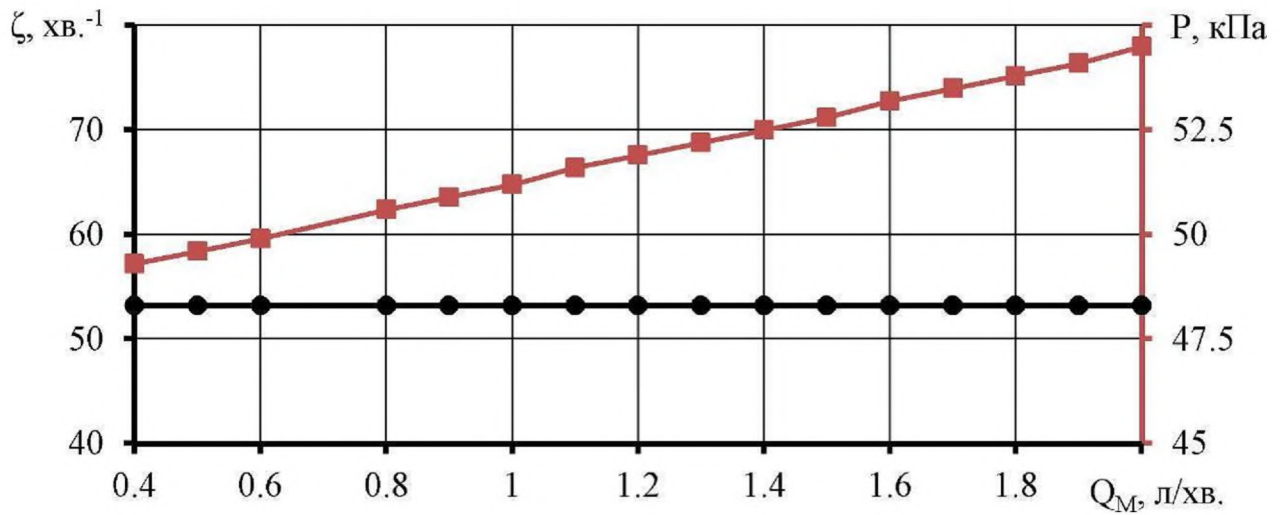


Рисунок 4.5 – Залежності частоти пульсацій  $\zeta$  і робочого тиску  $P$  вакуумної системи від швидкості виведення молока  $Q_M$  для варіанту з нижнім молокопроводом із доїльним апаратом одночасної дії

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стюдента  $t_{0,05}(30) = 2,04$  рівняння регресії (4.23) прийме вигляд

$$y_{\text{нмпд}} = 0,6. \quad (4.24)$$

У розкодованому вигляді модель (4.24) має вигляд

$$\Delta P_{\text{нмпд}} = 0,6. \quad (4.25)$$

Аналізуючи рівняння (4.25), можна стверджувати, що на флуктуацію вакуумметричного тиску для нижнього молокопроводу із доїльним апаратом парної дії не впливає жоден з факторів (рисунок 4.6).

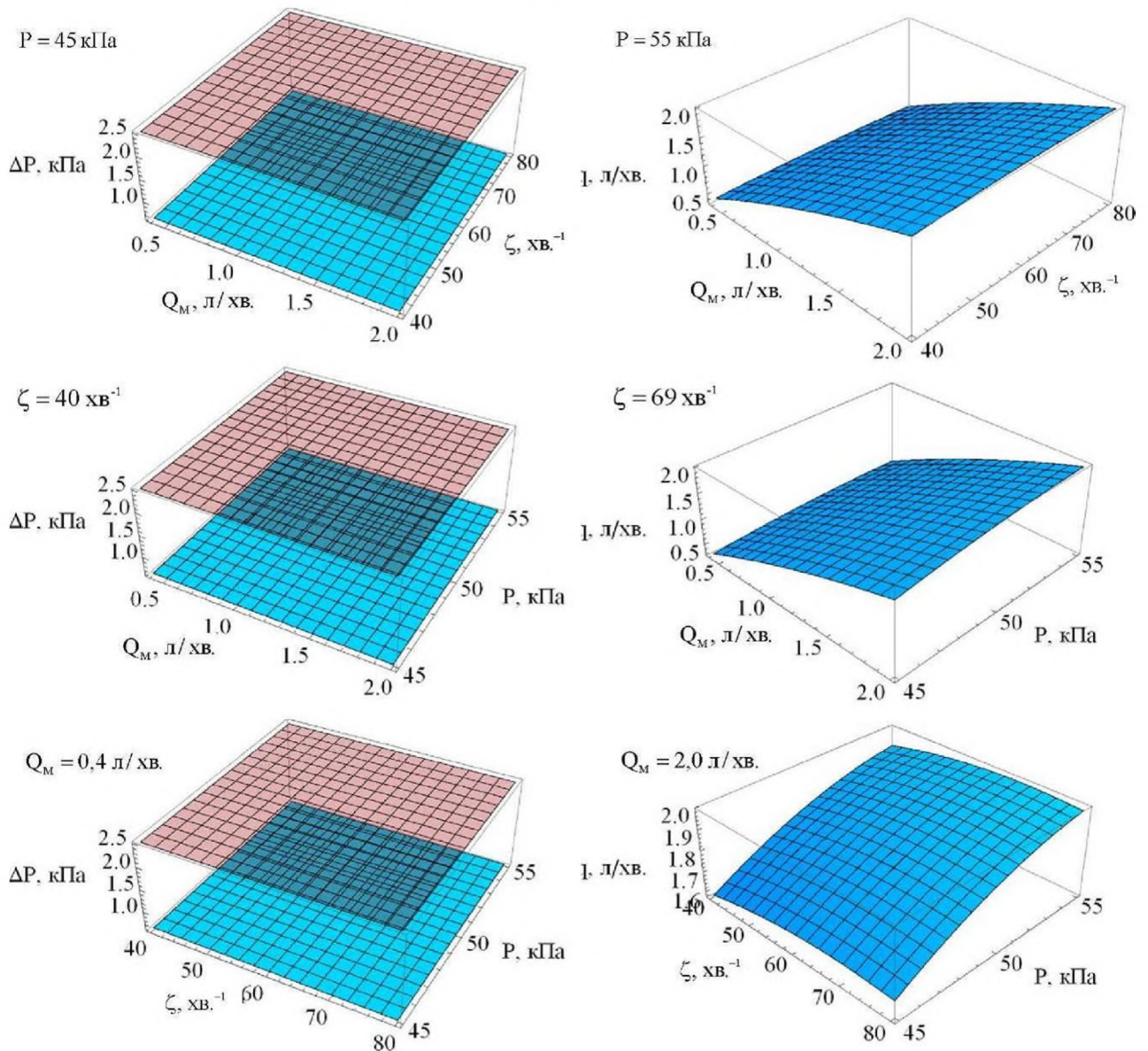
Також для варіанту з нижнім молокопроводом із доїльним апаратом парної дії створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на продуктивність доїльного апарата, яку можна представити у закодованому вигляді:

$$y_{2\text{нмпд}} = 1,24 + 0,72375x_1 - 0,08625x_1^2 + 0,0075x_2 + 0,035x_1x_2 - 0,03875x_2^2 + 0,10625x_3 + 0,0575x_1x_3 - 0,005x_2x_3 - 0,05625x_3^2. \quad (4.26)$$

Для цього рівняння на 95% рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена  $G = 0,2394 < G_{0,05}(2, 15) = 0,3346$ .



Дисперсія адекватності математичної моделі  $S_{ад}^2 = 0,0025$ ; дисперсія похибки дослідів  $S_y^2 = 0,0013$ ; значення критерію Фішера  $F = 1,95 < F_{0,05}(7, 30) = 2.33$ ; модель адекватна на будь-якому рівні довірчої ймовірності.



Зоотехнічні вимоги щодо флуктуації вакуумметричного тиску, які не повинні перевищувати 2,5 кПа відмічені червоною площиною

Рисунок 4.6 – Вплив швидкості виведення молока  $Q_M$ , частоти пульсацій  $\zeta$  і робочого тиску вакуумної системи  $P$  на флуктуацію вакуумметричного тиску  $\Delta P$  і продуктивність доїльного апарату  $q$  попарної дії для нижнього молокопроводу

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стюдента  $t_{0,05}(30) = 2,04$  рівняння регресії (4.26) прийме вигляд

$$y_{2\text{нмпд}} = 1,24 + 0,72375x_1 - 0,08625x_1^2 + 0,035x_1x_2 - 0,03875x_2^2 + 0,10625x_3 + 0,0575x_1x_3 - 0,05625x_3^2. \quad (4.27)$$

У розкодваному вигляді модель (4.27) має вигляд

$$q_{\text{нмпд}} = -6,05594 - 0,134766Q_M^2 + 0,009\zeta - 0,000096875\zeta^2 + 0,378125Q_M + 0,0021875Q_M\zeta + 0,014375Q_M P + 0,229P - 0,00225P^2. \quad (4.28)$$

Аналізуючи рівняння (4.28), можна стверджувати, що на продуктивність доїльного апарата попарної дії для нижнього молокопроводу впливають всі вищезгадані фактори (рисунок 4.6). При цьому зі збільшенням швидкості виведення молока і вакуумметричного тиску збільшується і продуктивність доїльного апарата, а при варіюванні значень частоти пульсацій доїльного апарата продуктивність доїльного апарата має оптимум:

$$q_{\text{вмод}}(Q_M = 2,0 \text{ л/хв.}; \zeta = 69 \text{ хв}^{-1}; P = 55 \text{ кПа}) = 1,99 \text{ л/хв.} \quad (4.29)$$

Рішенням системи рівнянь і нерівностей (4.8), (4.25), (4.28) для варіанту з нижнім молокопроводом із доїльним апаратом одночасної дії є залежності частоти пульсацій і робочого тиску вакуумної системи від швидкості виведення молока, графічна інтерпретація яких представлена на рисунку 4.7.

Аналіз отриманих відео-файлів процесу переміщення молочноповітряної суміші по молочному шлангу доїльного апарата дали змогу зробити наступні висновки. Для варіанту із верхнім молокопроводом режим течії молочноповітряної суміші є розподільним (рідина охоплює край шланга, а всередині рухається газ) із миттєвим переключенням до переривчастої течії (утворюється пробка із рідини). Для варіанту із нижнім молокопроводом спостерігається інший режим течії молочноповітряної суміші, а саме роздільна течія (рідина і газ рухається окремо, створюючи при цьому чітку границю розділу). Тобто використання в доїльних установках нижнього молокопроводу дає змогу отримувати молоко без включення бульбашок повітря.

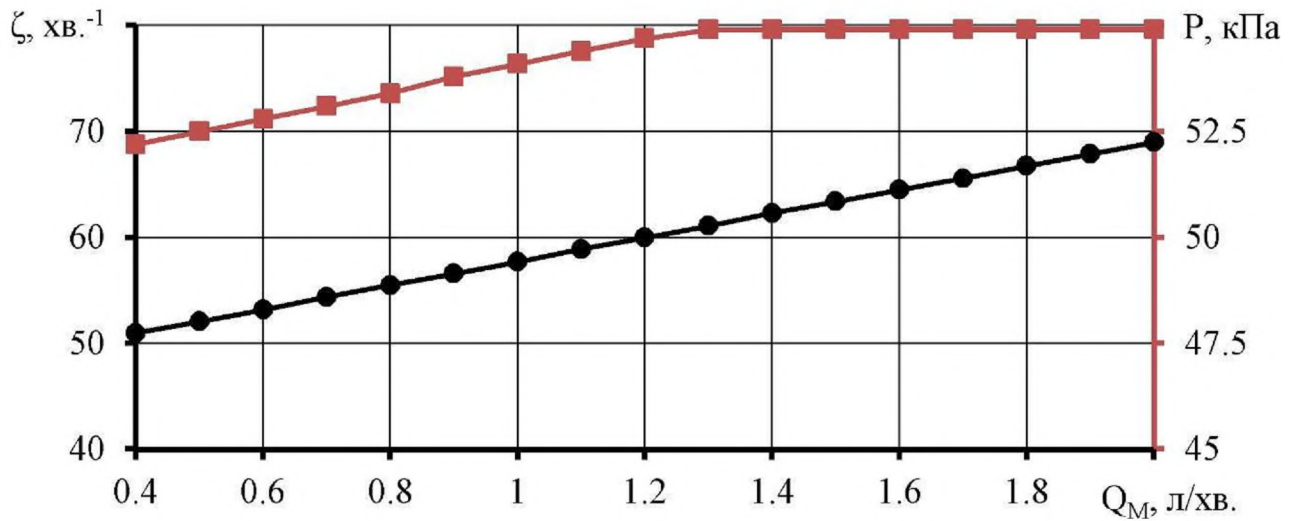


Рисунок 4.7 – Залежності частоти пульсацій  $\zeta$  і робочого тиску  $P$  вакуумної системи від швидкості виведення молока  $Q_M$  для варіанту з нижнім молокопроводом із доїльним апаратом попарної дії

#### 4.2 Адекватність математичних моделей процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті

Для порівняння математичних моделей процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті одночасної дії при верхньому молокопроводі, що отримані при чисельному моделюванні та експериментальних досліджень побудуємо графіки відповідних залежностей (2.19) і (4.3) (рисунки 4.8-4.9). Максимальне відхилення значення флуктуації вакуумметричного тиску між експериментальними і теоретичними даними в заданому діапазоні факторів складає 0,81 кПа, коефіцієнт кореляції – 0,92, а критерій Фішера становить  $2,01 < F_{\text{табл}}(0,05;5;30) = 2,53$ .



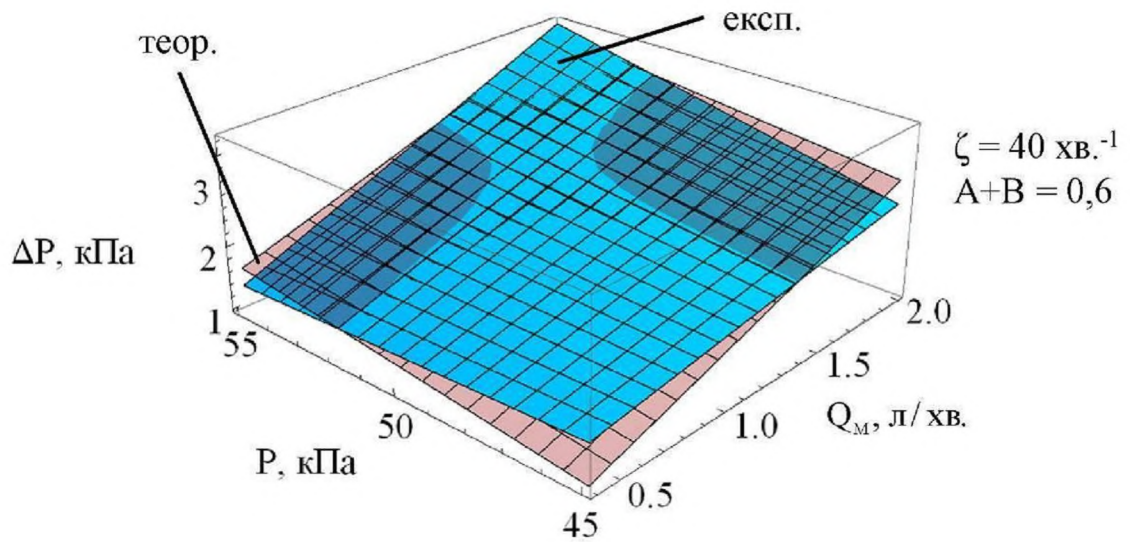


Рисунок 4.8 – Теоретична і експериментальна залежності впливу швидкості виведення молока  $Q_M$  і робочого тиску вакуумної системи  $P$  на флуктуацію вакуумметричного тиску  $\Delta P$  в молочному шлангу доїльного апарата одночасної дії для верхнього молокопроводу

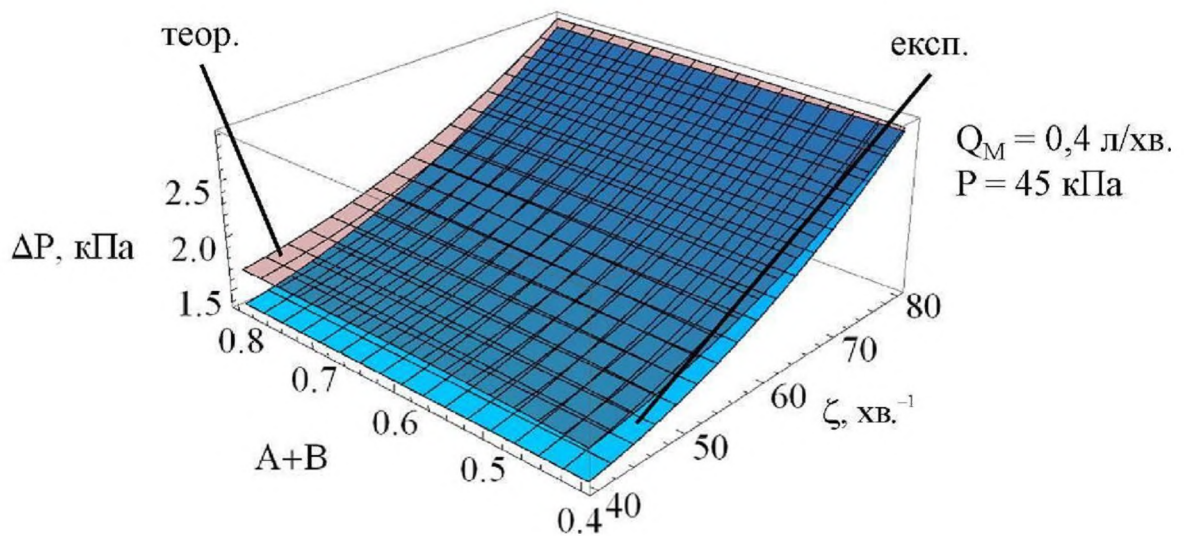


Рисунок 4.9 – Теоретична і експериментальна залежності впливу частоти пульсацій  $\zeta$  і фази  $A+B$  на флуктуацію вакуумметричного тиску  $\Delta P$  в молочному шлангу доїльного апарата одночасної дії для верхнього молокопроводу

Для порівняння математичних моделей процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті одночасної дії при нижньому молокопроводі, що отримані при чисельному моделюванні та експериментальних досліді-

джен побудуємо графіки відповідних залежностей (2.21) і (4.18) (рисунки 4.10-4.11). Максимальне відхилення значення флуктуації вакуумметричного тиску між експериментальними і теоретичними даними в заданому діапазоні факторів складає 0,34 кПа, коефіцієнт кореляція – 0,93, а критерій Фішера становить  $2,13 < F_{\text{табл}}(0,05;5;30) = 2,53$ .

Аналіз рисунків 4.8-4.11 показує, що характер теоретичних і експериментальних залежностей є однаковим, а високий коефіцієнт кореляції свідчить про адекватність розроблених теоретичних моделей.

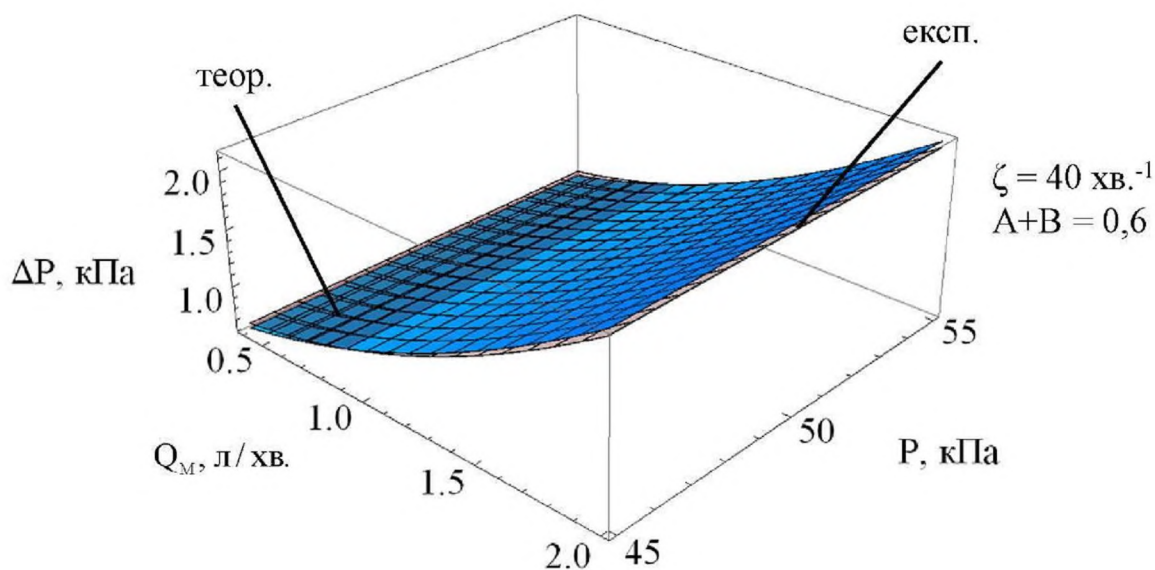


Рисунок 4.10 – Теоретична і експериментальна залежності впливу швидкості виведення молока  $Q_M$  і робочого тиску вакуумної системи  $P$  на флуктуацію вакуумметричного тиску  $\Delta P$  в молочному шлангу доїльного апарата одночасної дії для нижнього молокопроводу

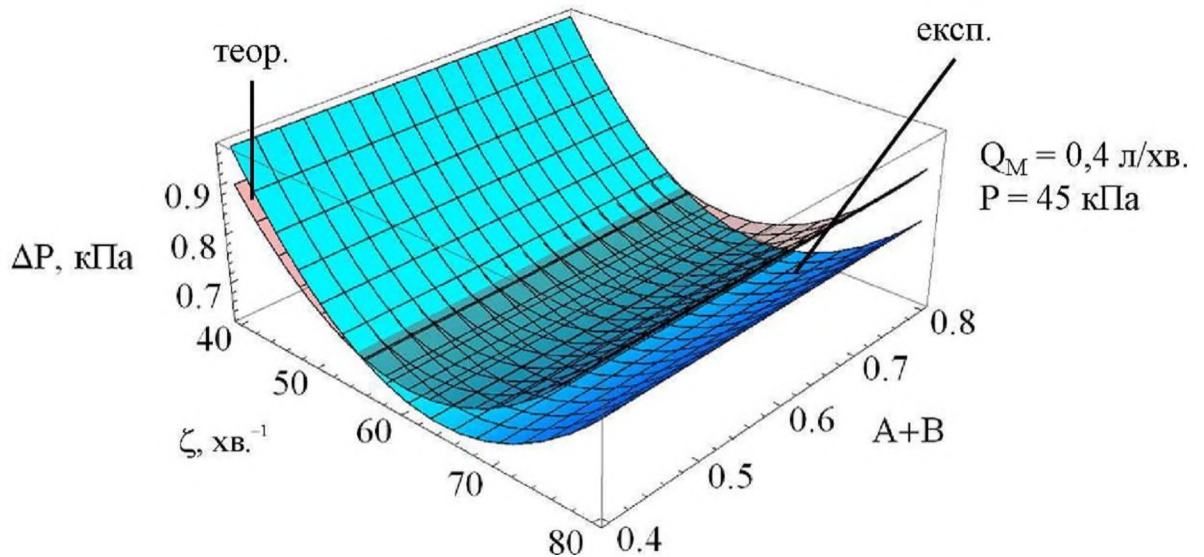


Рисунок 4.11 – Теоретична і експериментальна залежності впливу частоти пульсацій  $\zeta$  і фази  $A+B$  на флуктуацію вакуумметричного тиску  $\Delta P$  в молочному шланзі доїльного апарата одночасної дії для нижнього молокопроводу

### 4.3 Вплив режимних параметрів ротаційного пластинчатого вакуумного насоса на ефективність його експлуатації

В результаті збору даних з датчика тиску при різних дослідях отримана динаміка зміни вакуумметричного тиску в залежності від частоти обертання ротору та витрат повітря вакуумного насоса (додаток I). Для кожного дослідження розраховане середнє значення та середньоквадратичне відхилення (флуктуацію) вакуумметричного тиску і розроблені математичні моделі технологічного процесу створення вакууму ротаційним пластинчатим вакуумним насосом НВ-1200.

Результати експериментальних досліджень зведені в таблицю додатка I.

Згідно результатів досліджень було створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на продуктивність вакуумного насоса. Отримана математична модель має вигляд:

$$Q_a = 44,5436 + 0,426725 n - 1,56184 P + 0,16936 P^2 - 0,00266467 P^3, \quad (4.30)$$

де  $Q_a$  – продуктивність вакуумного насоса, л/хв;

$n$  – частота обертання ротору, об/хв.;



$P$  – величина вакуумметричного тиску, кПа.

За розрахованими значеннями коефіцієнта кореляції 0,97 модель є адекватною на заданому рівні довірчої ймовірності (0,95).

Аналізуючи рівняння (4.30), можна стверджувати, що на продуктивність розробленого вакуумного насоса впливають всі вищезгадані фактори. Графічну інтерпретацію залежності (4.30) представлено на рисунку 4.12. З рисунку 4.12 видно при певному значенні частоти обертання ротора вакуумного насоса продуктивність збільшується із падінням вакуумметричного тиску на ділянці від 50 до 90 кПа. Далі на ділянці від 0 до 50 кПа продуктивність вирівнюється на максимальну величину, яка лінійно залежить від частоти обертання.

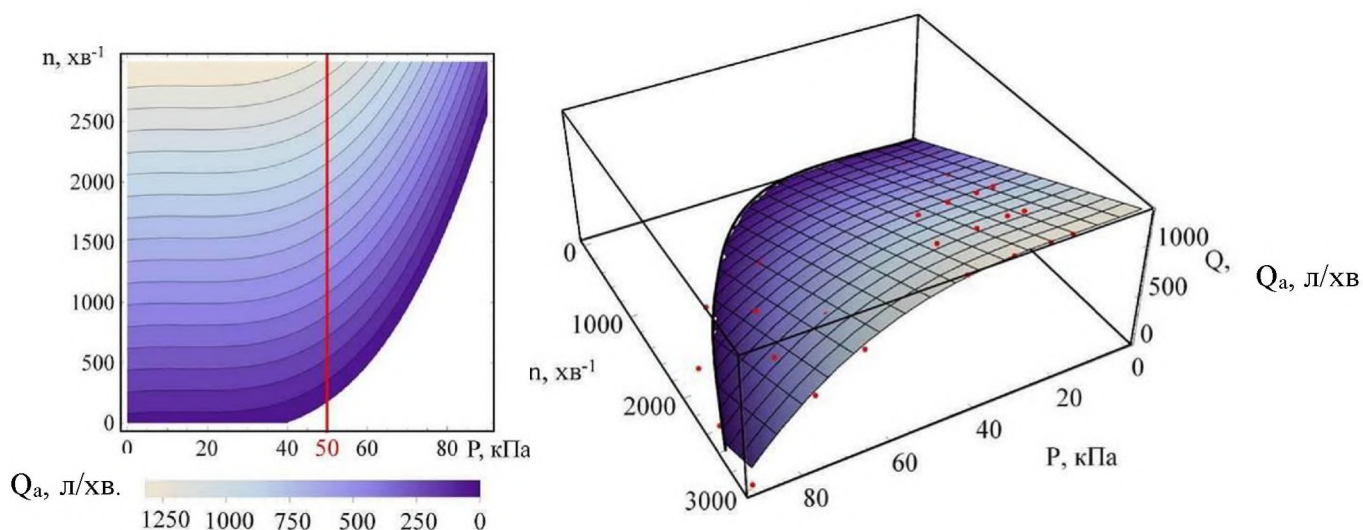


Рисунок 4.12 – Вплив частоти обертання ротора  $n$  та величини вакуумметричного тиску  $P$  на продуктивність вакуумного насоса  $Q_a$

Для флуктуації вакуумметричного тиску отримана математична модель впливу досліджуваних факторів (рисунок 4.13):

$$\Delta P = 0,087207 - 0,0000167177 n + 0,104101 P - 0,0000152404 n P \quad (4.31)$$

де  $\Delta P$  – флуктуація вакуумметричного тиску, кПа.

За розрахованими значеннями коефіцієнта кореляції 0,93 модель є адекватною на заданому рівні довірчої ймовірності (0,95).

Аналізуючи рисунок 4.13 встановлено, що із збільшенням вакуумметричного тиску збільшується і його флуктуація, а при збільшенні частоти обертання

ня флуктуація згасає. Це пов'язано із швидкістю зміни об'єму робочої камери ротаційного вакуумного насоса.

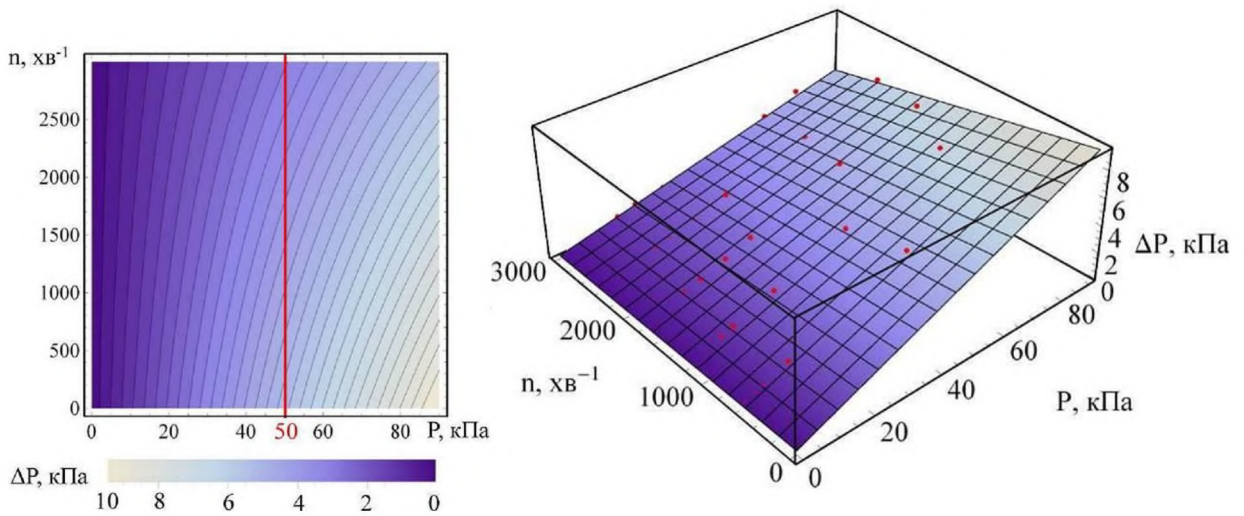


Рисунок 4.13 – Вплив частоти обертання ротору  $n$  та величини вакуумметричного тиску  $P$  на флуктуацію вакуумметричного тиску  $\Delta P$

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на споживану потужність привода вакуумного насоса має вигляд (рисунок 4.14):

$$N_p = -1,78081 + 0,003086 n + 0,01963 P - 3,71 \cdot 10^{-6} n P \quad (4.32)$$

де  $N_p$  – споживана потужність привода вакуумного насоса, кВт.

За розрахованими значеннями коефіцієнта кореляції 0,94 модель є адекватною на заданому рівні довірчої ймовірності (0,95).

Аналіз залежності (4.32) і її графічної інтерпретації (рисунок 4.14) показав, що на споживану потужність привода вакуумного насоса досліджувані фактори впливають лінійно. Причому зміна частоти обертання надає більшого впливу на потужність при вакуумметричному тиску від 40 до 90 кПа.



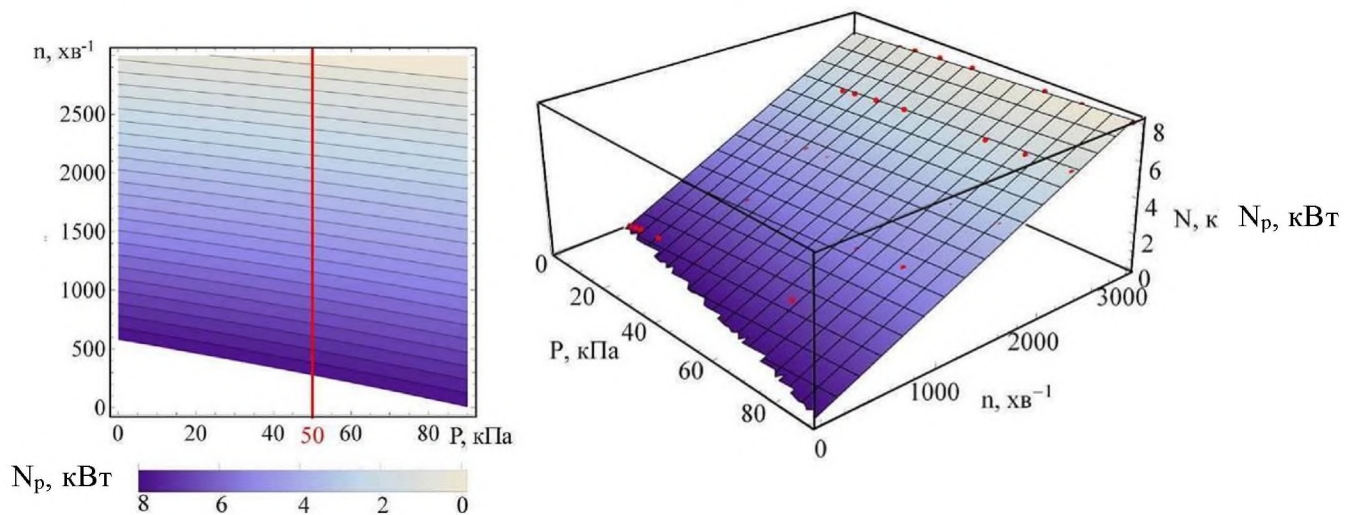


Рисунок 4.14 – Вплив частоти обертання ротору  $n$  та величини вакуумметричного тиску  $P$  на споживану потужність приводу вакуумного насоса  $N_p$

#### 4.4 Результати експериментальних досліджень системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса

Сучасні системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса використовують загальноприйнятий алгоритм (рисунок 4.15), який включає наступні етапи:

1. Встановлення значень заданого вакуумметричного тиску в вакуумній системі  $P_n$  і постійного кроку варіювання частоти обертання ротора вакуумного насоса  $\Delta n$ .
2. Обнуління значень вакуумметричного тиску в вакуумній системі  $P = 0$  і початкової частоти обертання ротора вакуумного насоса  $n = 0$ .
3. Вимірювання значення вакуумметричного тиску в вакуумній системі  $P$ .
4. У разі відключення кнопки «Стоп» або аварійної системи – продовження виконання операцій, в противному випадку – обнуління частоти обертання ротора вакуумного насоса  $n = 0$  і кінець виконання алгоритму.
5. Порівняння значення вакуумметричного тиску в вакуумній системі  $P$  із заданим  $P_n$ .
6. У разі виконання умови  $P < P_n$  – збільшення частоти обертання ротора вакуумного насоса  $n$  на крок  $\Delta n$ , в противному випадку – її зменшення.
7. Повторення циклу з п. 3.



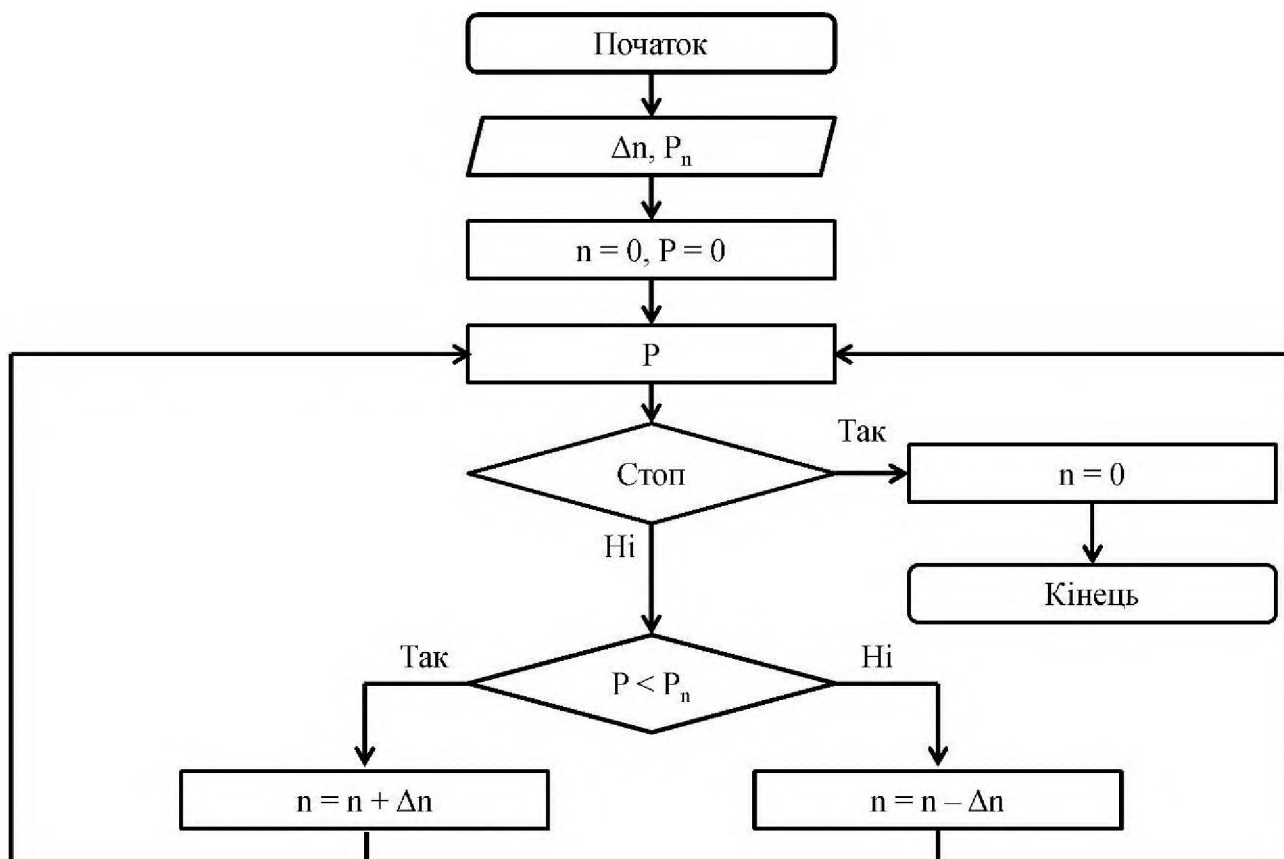


Рисунок 4.15 – Загальноприйнятий алгоритм системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса

На основі результатів досліджень режимних і технологічних параметрів розробленого ротаційного пластинчастого вакуумного насоса НВ-1200 створено новий алгоритм системи його сервоконтролю (рисунок 4.16), який включає:

1. Встановлення значень заданого вакуумметричного тиск в вакуумній системі  $P_n$  і кроку варіювання частоти обертання ротора вакуумного насоса  $\Delta n$ , який залежить від витрат повітря в системі  $Q_a$  згідно (4.30).

2. Обнуління початкових значень вакуумметричного тиск в вакуумній системі  $P = 0$ , частоти обертання ротора вакуумного насоса  $n = 0$  і витрат повітря в системі  $Q_a = 0$ .

3. Вимірювання значення витрат повітря в системі  $Q_a$ .

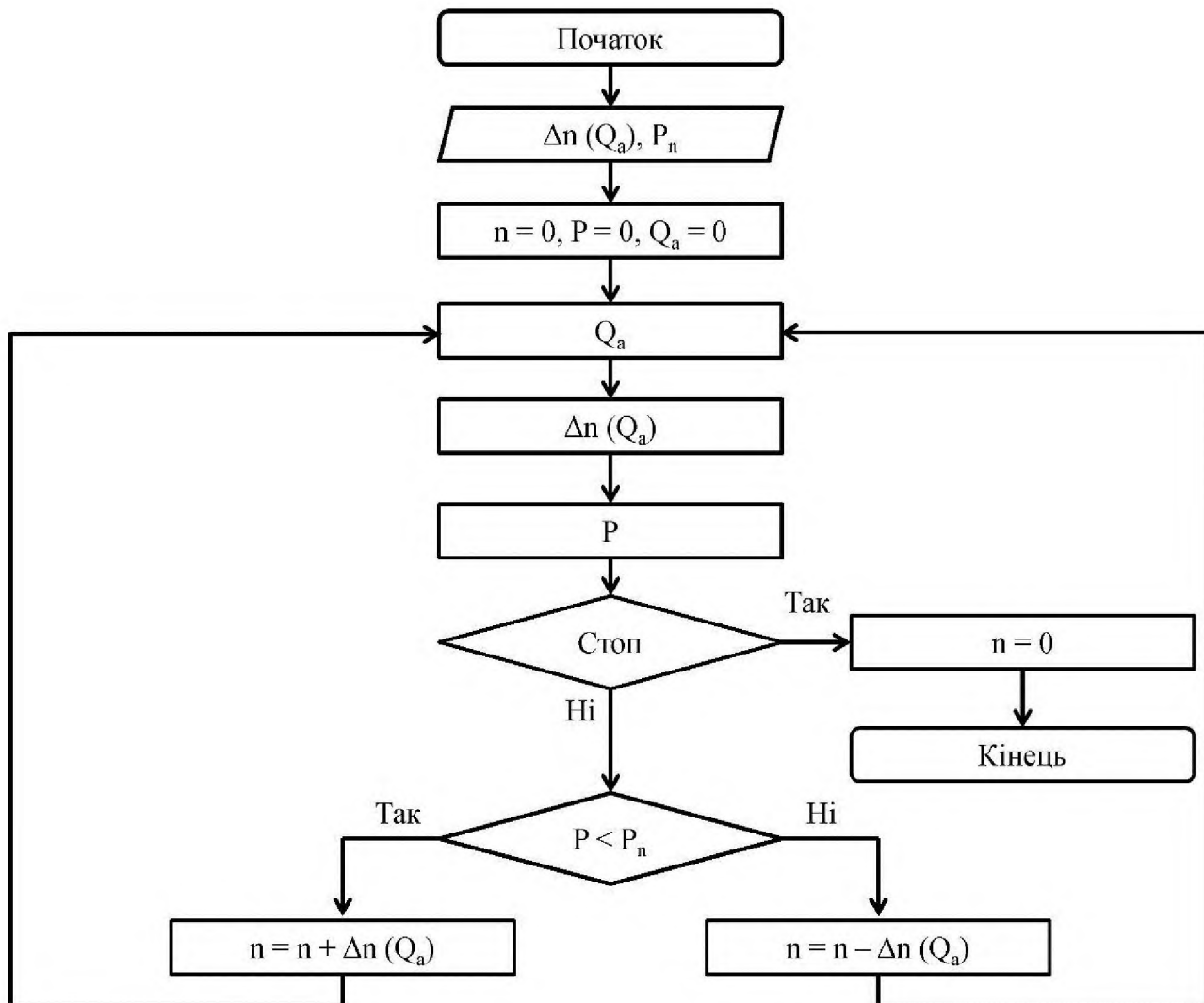


Рисунок 4.16 – Алгоритм системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса

4. Розрахунок кроку варіювання частоти обертання ротора вакуумного насоса  $\Delta n (Q_a)$  за формулою (4.30):

$$\Delta n = \frac{Q_a - 44,5436 + 1,56184 P - 0,16936 P^2 + 0,00266467 P^3}{0,426725} \quad (4.33)$$

5. Вимірювання значення вакуумметричного тиску в вакуумній системі  $P$ .

6. У разі відключення кнопки «Стоп» або аварійної системи – продовження виконання операцій, в протилежному випадку – обнуління частоти обертання ротора вакуумного насоса  $n = 0$  і кінець виконання алгоритму.

7. Порівняння значення вакуумметричного тиску в вакуумній системі  $P$  із заданим  $P_n$ .

8. У разі виконання умови  $P < P_n$  – збільшення частоти обертання ротора вакуумного насоса  $n$  на крок  $\Delta n$  ( $Q_a$ ), в противному випадку – її зменшення.

9. Повторення циклу з п. 3.

Згідно розробленої методики (розділ 3.3) для запропонованих алгоритмів було отримано динаміку зміни вакуумметричного тиску  $P$  і частоти обертання ротора вакуумного насоса  $n$  при зміні витрат повітря  $Q_a$  молочно-вакуумної системи доїльної установки (рисунки 4.17-4.18).

Аналіз рисунка 4.17 показав, що для загальноприйнятого алгоритму із збільшенням витрат повітря збільшується і флуктуація вакууму: при  $\Delta Q_a = 45$  л/хв. –  $\Delta P = 2,3$  кПа, при  $\Delta Q_a = 90$  л/хв. –  $\Delta P = 4,6$  кПа, при  $\Delta Q_a = 135$  л/хв. –  $\Delta P = 6,4$  кПа. На відміну від загальноприйнятого алгоритму, розроблений забезпечує стабільний вакуумний режим, що підтверджується рисунком 4.18 – найбільша флуктуація вакууму складає  $\Delta P = 2,4$  кПа.

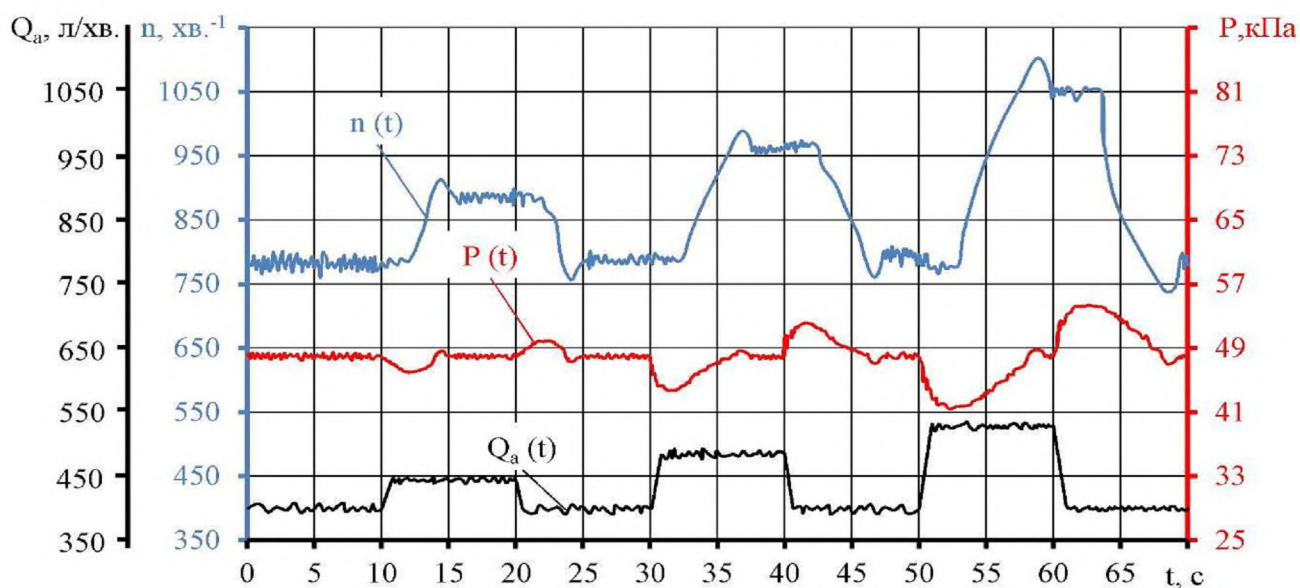


Рисунок 4.17 – Динаміка зміни вакуумметричного тиску  $P$  і частоти обертання ротора вакуумного насоса  $n$  при зміні витрат повітря  $Q_a$  молочно-вакуумної системи доїльної установки для загальноприйнятого алгоритму

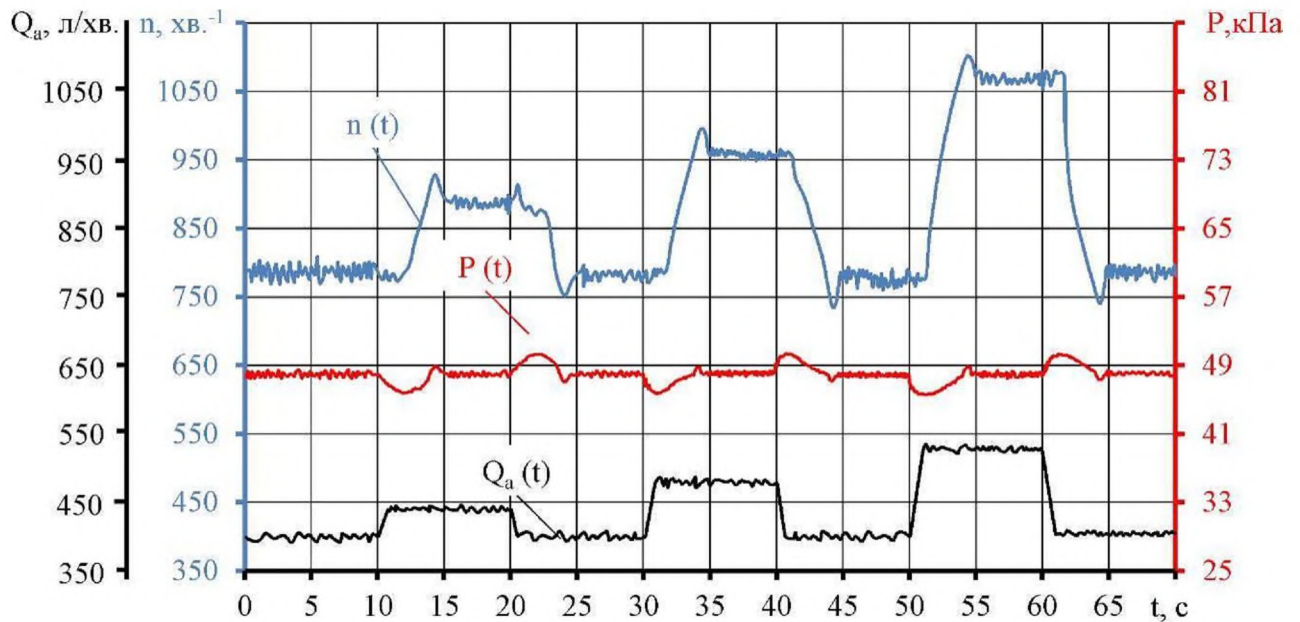


Рисунок 4.18 – Динаміка зміни вакуумметричного тиску  $P$  і частоти обертання ротора вакуумного насоса  $n$  при зміні витрат повітря  $Q_a$  молочно-вакуумної системи доїльної установки для розробленого алгоритму

Для перевірки енергетичної ефективності запропонованих алгоритмів було побудовано графіки зміни потужності привода вакуумного насоса  $N_p$  від часу  $t$  (рисунок 4.19).

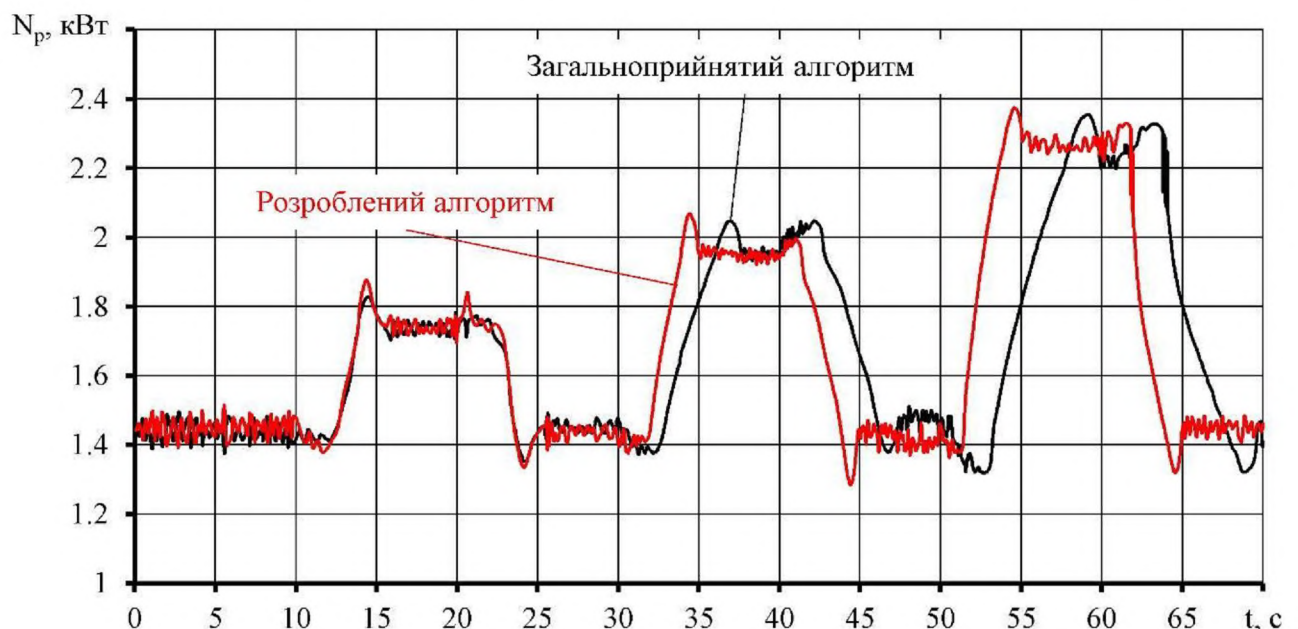


Рисунок 4.19 – Динаміка зміни потужності привода вакуумного насоса  $N_p$  для запропонованих алгоритмів

Встановлено, що енергетична ефективність запропонованих алгоритмів є практично однаковою, про що свідчать значення площі під функціями  $N_p(t)$ :



для загальноприйнятого алгоритму  $N_p \cdot t = 117,23$  кДж, для розробленого алгоритму  $N_p \cdot t = 117,19$  кДж.

Тому можна стверджувати, що розроблений алгоритм забезпечує більш стабільний вакуумний режим молочно-вакуумної системи  $\Delta P = 2,4$  кПа без зниження енергетичної ефективності.

### **Висновки з розділу**

1. В результаті експериментальних досліджень процесу переміщення молочно-повітряної суміші в доїльній установці з верхнім та нижнім молокопроводами встановлені залежності режимних параметрів доїльних апаратів одночасної та попарної дії (величина робочого тиску  $P$  і частота пульсацій  $\zeta$ ) від швидкості виведення молока з вимені при умові зоотехнічних вимог щодо флуктуації вакуумметричного тиску ( $\Delta P(Q_M, \zeta, P) < 2,5$  кПа) і забезпечення максимальної продуктивності ( $q(Q_M, \zeta, P) \rightarrow \max$ ).

2. В результаті порівняння розроблених теоретичних математичних моделей процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті із отриманими експериментальними залежностями встановлено, що максимальне відхилення значення флуктуації вакуумметричного тиску  $\Delta P$  між експериментальними і теоретичними даними в заданому діапазоні факторів складає 0,81 кПа, а коефіцієнт кореляції – 0,92, що свідчить про адекватність розроблених моделей.

3. За результатами експериментальних досліджень встановлені залежності зміни режимних і технологічних параметрів розробленого ротаційного пластинчатого вакуумного насоса НВ-1200, що входять до створеного алгоритму системи його сервоконтролю, який забезпечує більш стабільний вакуумний режим молочно-вакуумної системи  $\Delta P = 2,4$  кПа без зниження енергетичної ефективності.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [175, 176, 177, 178, 179].