МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ЛИННИК ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 637.116:621.521

ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ МОЛОЧНО-ВАКУУМНИХ СИСТЕМ ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВОК

05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертація є рукопис

Робота виконана в Дніпропетровському державному аграрно-економічному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Павленко Сергій Іванович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
провідний науковий співробітник Науково-дослідного
інституту техніки, енергетики та інформатизації АПК

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Фененко Анатолій Іванович,
Національний науковий центр
«Інститут механізації та електрифікації
сільського господарства» НААН,
головний науковий співробітник відділу біотехнічних
систем у тваринництві та заготівлі кормів

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Ясенецький Володимир Антонович,
Державна наукова установа «Український науково-
дослідний інститут прогнозування та випробування
техніки і технологій для сільськогосподарського
виробництва імені Леоніда Погорілого»,
провідний науковий співробітник лабораторії
наукового забезпечення підготовки кадрів
та пропаганди інноваційних розробок

Захист відбудеться «8» грудня 2016 року о 13^{00} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.06 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Генерала Родимцева, 19, навчальний корпус № 1, кімната 97

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розісланий «7» листопада 2016 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради І. Л. Роговський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогодні існує широкий вибір високопродуктивних доїльних установок із системами сервоконтролю їх молочно-вакуумних систем, основним критерієм ефективної експлуатації яких є енерговитрати. Одним з недоліків таких установок є нестаціонарні коливання вакуумного режиму, які згідно зоотехнічних та міжнародних техніко-технологічних вимог призводять до значного технологічного впливу на мікроструктуру молока та фізіологічний стан тварини. Таким чином, підвищення ефективності експлуатації доїльних установок шляхом стабілізації вакуумного режиму має народногосподарське значення і є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, що складають основу дисертації, проведено в Дніпропетровському державному аграрно-економічному університеті згідно з планом науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт за темою «Удосконалення технологій, машин і обладнання тваринництва» (номер державної реєстрації 0114U001761).

Мета та задачі дослідження. Метою досліджень є підвищення ефективності експлуатації молочно-вакуумних систем доїльних установок шляхом конструктивно-технологічного забезпечення процесу стабілізації вакуумного режиму. Для досягнення поставленої мети було висунуто наукову гіпотезу, згідно з якої стабільність вакуумного режиму доїльних установок залежить від гідродинамічних процесів руху молочно-повітряної суміші і може бути забезпечена системою сервоконтролю ротаційних пластинчастих вакуумних насосів із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами.

Для досягнення поставленої мети сформульовано задачі дослідження:

– провести огляд впливу стабільності вакуумного режиму доїльних установок на технологічний процес машинного доїння та існуючого конструктивно-технологічного забезпечення стабілізації вакуумметричного тиску;

– встановити функціональні залежності впливу гідродинамічних параметрів руху молокоповітряної суміші молокопровідною лінією доїльної установки на стабільність вакуумного режиму;

– дослідити робочий процес ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки із автоматичною системою його сервоконтролю та обґрунтувати його конструктивно-режимні параметри;

– провести експериментальні дослідження процесу переміщення молочно-повітряної суміші в доїльній установці та визначити вплив гідродинамічних параметрів її руху на стабільність вакуумного режиму;

– встановити залежності зміни режимних і технологічних параметрів розробленого ротаційного пластинчатого вакуумного насоса із системою його сервоконтролю;

– провести виробничу апробацію та економічну оцінку ефективності використання системи сервоконтролю ротаційних пластинчастих вакуумних насосів із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами у складі доїльних установок.

Об'єкт дослідження – технологічний процес функціонування доїльних установок із системою сервоконтролю ротаційних пластинчастих вакуумних насосів.

Предмет дослідження – залежності та режими роботи функціонування доїльних установок із системою сервоконтролю ротаційних пластинчастих вакуумних насосів.

Методи дослідження. В основу теоретичних досліджень покладено методи чисельного моделювання з використанням математичних моделей багатофазної

взаємодії, основних положень теоретичної механіки, молекулярної теорії і законів термодинаміки. При цьому застосовувались методи диференційного та інтегрального числення.

Експериментальні дослідження проводились з використанням математичного методу планування експерименту, методів натурних спостережень та експертних оцінок, а обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень здійснювались з використанням теорії ймовірності, кореляційно-регресійного аналізу.

Обробка результатів досліджень здійснювалась з використанням програмних пакетів Mathematica, Star CCM+ і PumpLinx.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

– *вперше отримано* функціональну залежність впливу режимних параметрів ротаційного пластинчастого вакуумного насоса із автоматичною системою його сервоконтролю на стабільність вакуумного режиму молочно-вакуумної системи доїльної установки;

– *набула подальшого розвитку і практично перевірено* закономірність щодо впливу режимних параметрів розробленої автоматичної системи сервоконтролю ротаційного пластинчатого вакуумного насоса доїльної установки на її якісні й енергетичні показники роботи;

– *набула подальшого розвитку* функціональна залежність впливу гідродинамічних параметрів руху молокоповітряної суміші, як двофазного середовища, молокопровідною лінією доїльної установки на стабільність вакуумного режиму.

Практичне значення одержаних результатів. Результати теоретичних та експериментальних досліджень процесу переміщення молочно-повітряної суміші у вигляді залежності режимних параметрів доїльних апаратів від швидкості виведення молока використано під час наладки і програмування блока керування доїльного апарата Metatron 21 в ПП «Агромех Плюс» (провідний дилер GEA WestfaliaSurge в Дніпропетровській області).

Розроблено ротаційний пластинчатий вакуумний насос доїльної установки із автоматизованою системою його керування із відповідно обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами. Розроблений алгоритм системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса використано під час програмування блока керування доїльної установки «Ялинка 2×10» на молочній фермі ТОВ «Агрофірма «Красний забойщик» Криворізького району Дніпропетровської області. Результати досліджень руху молокоповітряної суміші по молокопровідній лінії доїльної установки і процесу функціонування системи сервоконтролю ротаційних пластинчастих вакуумних насосів використовуються в навчальному процесі при викладанні дисципліни «Машини та обладнання для тваринництва» студентам напряму підготовки «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва».

Новизна технічного рішення, що лягла в основу системи сервоконтролю ротаційного пластинчатого вакуумного насоса доїльної установки, захищено патентами України на корисну модель № 98052 і № 98053.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які відображають суть дисертації, отримано автором самостійно. Постановка задач, аналіз і трактування результатів виконано спільно з науковим керівником та частково із співавторами публікацій.

Автором особисто проведено аналіз впливу стабільності вакуумного режиму доїльних установок на технологічний процес машинного доїння; розроблено математичну модель руху молокоповітряної суміші по молокопровідній лінії

доїльної установки; розроблено механіко-математичну модель робочого процесу ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки із автоматичною системою його сервоконтролю; проведено експериментальні дослідження процесу переміщення молочно-повітряної суміші в доїльній установці; встановлено залежності зміни режимних і технологічних параметрів розробленого ротаційного пластинчатого вакуумного насоса із системою його сервоконтролю; визначено економічну ефективність використання системи сервоконтролю ротаційних пластинчастих вакуумних насосів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались на Міжнародній науковій сесії «Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин» (м. Харків, 2014 р.); X Міжнародному форуму молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка в XXI сторіччя» (м. Харків, 2014 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Науково-технічний прогрес в сільськогосподарському виробництві» (м. Мінськ, Республіка Білорусь, 2014 р.); XI Міжнародній науково-практичній конференції «Стратегічні питання світової науки – 2015» (м. Пшемисль, Республіка Польща, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві» (м. Харків, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології у виробництві сільськогосподарської продукції» (м. Мінськ, Республіка Білорусь, 2015 р.).

Публікації. Основні положення дисертації викладено у 18 наукових працях, з яких 5 статей у наукових фахових виданнях України, стаття у науковому фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних, 2 статті у наукових виданнях інших держав, 2 статті в інших наукових виданнях, 2 патенти на корисні моделі та 6 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 187 найменувань та 12 додатків. Дисертацію викладено на 212 сторінках комп’ютерного тексту, містить 9 таблиць та 68 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі **«Сучасний стан питання і вибір напрямів досліджень»** виконано аналіз виробництва молока в господарствах України та сучасного молочно-доїльного обладнання, представлено чинники і наслідки дестабілізації вакуумного режиму доїльних установок, проведено огляд конструктивно-технологічного забезпечення процесу стабілізації вакуумного режиму і автоматичних систем сервоконтролю вакуумних насосів.

Технологічна задача підвищення ефективності експлуатації доїльних установок за останнє десятиріччя набула значного поширення. Вирішенням цієї проблеми займалися такі відомі вчені, як Л. П. Карташов (1971), В. Ф. Корольов (1972), В. М. Победінський (1993), В. А. Борознін, (1999), М. М. Луценко (2006), В. І. Смоляр (2006), А. І. Фененко (2008), Н. М. Подолько (2008), В. О. Кітіков (2010), В. В. Ткач (2010), С. В. Сурков (2010), Ю. В. Бобильов (2010), В. Т. Дмитрів (2012), С. І. Павленко (2013), В. Ю. Дудін (2013), Е. Б. Алієв (2014), В. А. Ясенецкий (2015), І. І. Ревенко (2016) та інші дослідники. За їх теоретичними та експериментальними дослідженнями було встановлено, що при сталих

гідродинамічних параметрах руху молочно-повітряної суміші вакуумний насос повинен забезпечувати стабільний вакуумний режим 48,0 кПа, коливання вакуумметричного тиску в молочній і вакуумній системах не повинні перевищувати 2,5 кПа, що обумовлено зоотехнічними, санітарно-гігієнічними та технологічними вимогами. Аналіз конструктивно-технологічного забезпечення процесу стабілізації вакуумного режиму доїльної установки показав, що на сьогодні зазначений процес найчастіше досягається шляхом збільшення об'єму молочно-вакуумної системи і як наслідок – збільшення продуктивності вакуумних насосів та потужності, що споживає доїльна установка. Контроль показників вакуумного режиму у різних точках і вузлах доїльної установки при цьому може бути забезпечений системою сервоконтролю вакуумних насосів. В результаті аналізу існуючих конструкцій вакуумних насосів доїльних установок встановлено, що ротаційний пластинчатий вакуумний насос в порівнянні з іншими має високий механічний ККД, низьку енергоємність, простоту конструкції і обслуговування, швидкохідність, що вказує на найбільшу доцільність використання його в якості силового агрегату.

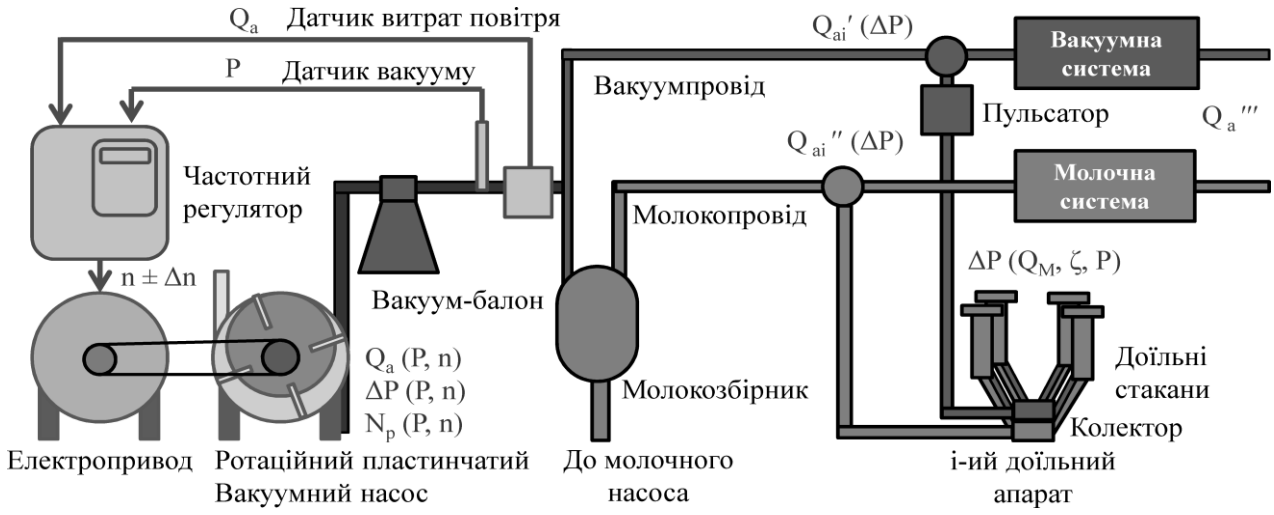


Рис. 1. Взаємозв'язок техніко-технологічних параметрів доїльної установки із системою сервоконтролю ротаційного пластинчатого вакуумного насоса

Аналіз взаємозв'язку техніко-технологічних параметрів доїльної установки із автоматичною системою сервоконтролю ротаційного пластинчатого вакуумного насоса (рис. 1) дозволив встановити наступні умови її ефективної роботи: баланс витрат повітря $Q_a(P,n)=\sum_{i=1}^{Z}\left(Q'_{ai}(\Delta P)+Q''_{ai}(\Delta P)\right)+Q'''_a$; не перевищення флуктуації вакууму певного значення $\Delta P(Q_M,\zeta,P)<2{,}5\ \text{кПа}$; мінімальна потужність двигуна вакуумного насоса, що витрачається $N_p(P,n)\to\min$, де P – вакуумметричний тиск, Па; ΔP – флуктуація (коливання) вакуумметричного тиску, Па; n – частота обертів ротора вакуумного насоса, хв$^{-1}$; Q_a, Q_a', Q_a'', Q_a''' – витрати повітря в системі (або продуктивність вакуумного насоса), вакуумної (вакуумний шланг, пульсатор) і молочної (молочний шланг, колектор, доїльні стакани) складової доїльного апарата та інших вузлах доїльної установки відповідно, л/хв; Z – кількість доїльних апаратів; і – порядковий номер доїльного апарата; Q_M – витрати молока на один доїльний апарат, л/хв; ζ – частота пульсацій, хв$^{-1}$; N_p – потужність, що витрачається приводом вакуумного насоса, Вт.

У другому розділі **«Теоретичні дослідження процесу стабілізації вакуумного режиму доїльної установки»** розроблено математичну модель і проведено чисельне моделювання процесу переміщення молокоповітряної суміші по молокопровідній лінії доїльної установки, створено математичну модель процесу функціонування системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса і проведено чисельне моделювання його робочого процесу.

Аналіз руху молокоповітряної суміші по молокопровідній лінії доїльної установки, яка знаходиться під деяким кутом φ до горизонту, проведено з урахуванням наступних припущень: молокоповітряна суміш представляється у вигляді двофазного середовища рідина-газ; рідину приймаємо, як нестискаюче середовище, а газ – як ідеальний; падіння тиску вздовж молокопроводу пов'язано з гравітаційною силою двофазного середовища, сили інерції і тертя. Баланс імпульсу для прийнятої ділянки молокопроводу із двофазним потоком молокоповітряної суміші представимо у вигляді рівняння градієнта тиску:

$$\partial P / \partial z = g\rho_м \sin\varphi + \rho_м u_м \left(du_м / dz\right) + 2f_м \rho_м u_м^2 / D, \qquad (1)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с^2; $\rho_м = \alpha\rho_G + (1-\alpha)\rho_L$ – щільність двофазного середовища, кг/м^3; φ – кут нахилу ділянки молокопроводу; $u_м$ – швидкість руху двофазного середовища по молокопроводу, м/с; D – діаметр молокопровода (молочного шланга), м; $\rho_G = M_G P / RT$ – щільність газу в двофазному середовищі, кг/м^3; ρ_L – щільність рідини в двофазному середовищі, кг/м^3; α(z) – вміст газу в двофазному середовищі; M_G – молярна маса газу, кг/моль; R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); T – температура, К; $f_м$(Re, ε) – коефіцієнт тертя двофазного середовища об стінки молокопровода (молочного шланга); ε – абсолютна шорсткість молокопровода (молочного шланга), м; $Re = u_м \cdot D \cdot \rho_м / \mu_м$ – число Рейнольдса; $\mu_м = \alpha\mu_G + (1-\alpha)\mu_L$ – динамічна в'язкість двофазного середовища, Н·с/м^2; μ_L – динамічна в'язкість рідини в двофазному середовищі, Н·с/м^2; μ_G – динамічна в'язкість газу в двофазному середовищі, Н·с/м^2.

Для розвязку диференційного рівняння (1) складемо граничні умови для ділянки молокопровода:

$$u_G\big|_{z=0} = u_{G(A-A)}, \quad u_L\big|_{z=0} = u_{L(A-A)}, \quad \alpha\big|_{z=0} = \alpha_{A-A}, \quad P\big|_{z=L} = P_{B-B}, \quad \alpha\big|_{z=L} = \alpha_{B-B}, \qquad (2)$$

де L – довжина молокопровода (молочного шланга), м.

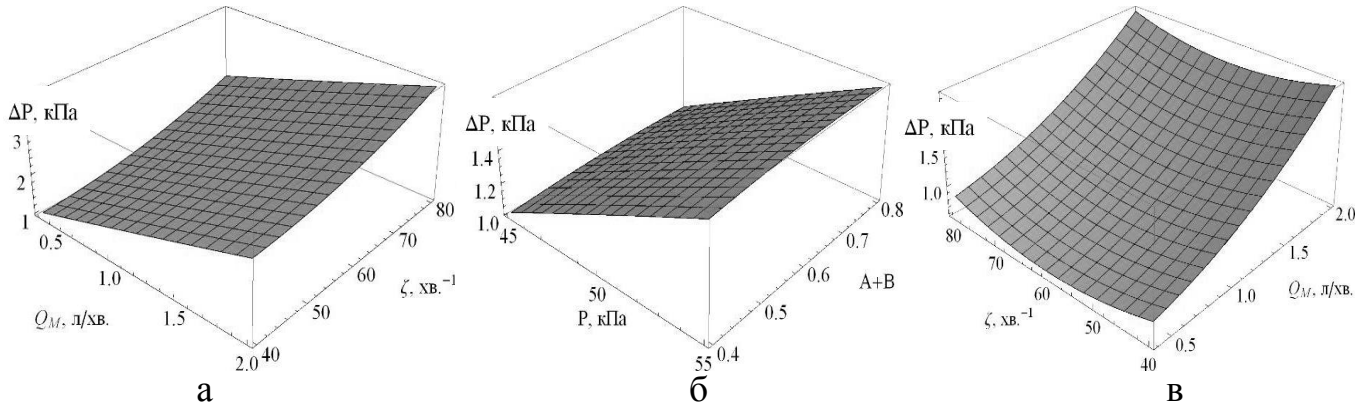
У зв'язку із складністю розв'язку системи диференційних рівнянь (1), (2) дослідження руху молокоповітряної суміші проводилось методом чисельного моделювання з використанням програмного пакету Star CCM+. Для проведення моделювання було побудовано сітку 3D моделі молочного шланга доїльного апарата для двох типів молокопровідних систем (з верхнім та нижнім молокопроводами) з використанням генератора поверхневої сітки і багатогранних комірок, базовий розмір комірки складав 0,001 м. Моделювання проводилося з використанням моделі багатофазної взаємодії, Ейлерової багатофазності, метода об'ємної рідини. Рух фаз підпорядковується k-ε моделі турбулентності. Молокоповітряна суміш представлялася як двофазне середовище рідина-газ. Термодинамічний стан молокоповітряної суміші припускався, як ізотермічний. Було прийнято, що рідина в процесі руху мала постійну щільність, а газ був ідеальним. В початковий момент часу молочний шланг був заповнений тільки газом (повітрям), тобто вміст газу складав α = 1. Поверхня молочного шланга мала абсолютну шорсткість ε = 2,5·10^{-6} м. На вході молочного шланга доїльного апарата потік повітря через провідний канал колектор (діаметром $d_{от}$ = 10^{-4} м) складає $Q_{G(A-A)}$ = 3,3·10^{-5} м^3/с (2 л/хв), при цьому швидкість повітря дорівнює $U_{G(A-A)}$ = 0,00427 м/с. Молоко на вході молочного шланга доїльного апарата поступає порціями із певною періодичністю. Для

двотактного доїльного апарата одночасної дії на всі дійки пульсограма вакуумметричного тиску у міжстіному просторі доїльних стаканів характеризується двома параметрами – частота пульсацій ζ і фаза А+В. В процесі доїння в період розвантаження (фаза А+В) порція молока виводиться з дійок і потрапляє через колектор в молочний шланг. Потік молока $Q_{L(A-A)max}$ в період розвантаження (швидкість виведення молока з дійок корови) може змінюватися від 0,4 ($6{,}67\cdot10^{-6}$ м^3/с) до 2 л/хв ($3{,}33\cdot10^{-5}$ м^3/с). При внутрішньому діаметрі молочного шланга D = 0,014 м швидкість молока $U_{G(A-A)}$ змінюється від 0,0433 до 0,216 м/с. Частота пульсацій ζ може складати від 40 до 80 хв$^{-1}$, а фаза А+В в межах від 0,4 до 0,8. На виході з молочного шланга присутній постійний вакуумметричний тиск $P_{B\text{-}B}$, який може вимріюватися у допустимих межах від 45 до 55 кПа. Тому чисельне моделювання проводилося за повним планом дослідів для чотирьох факторів на трьох рівнях.

В результаті чисельного моделювання процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті одночасної дії при верхньому молокопроводі отримано розподіл вмісту рідини 1-α по довжині молочного шланга. Через виникнення переривчастої течії молокоповітряної суміші на вході молочного шланга спостерігаються флуктуації вакуумметричного тиску, що негативно впливають на технологічний процес машинного доїння. З використанням програмного пакету Mathematica методом найменших квадратів було проведено апроксимацію отриманих даних за обраним планом дослідів і отримано математичну модель взаємозв'язку флуктуації (середнє квадратичне відхилення) вакуумметричного тиску із факторами чисельного моделювання:

$$\begin{aligned}\Delta P = &-1{,}3813 + 0{,}490741\,(A+B) - 0{,}509259\,(A+B)^2 - 0{,}0567639\,\zeta + \\ &+ 0{,}00069444\,(A+B)\zeta + 0{,}00051852\,\zeta^2 + 0{,}0604815\,P + \\ &+ 0{,}00277778\,(A+B)P + 0{,}00044444\,\zeta P - 0{,}00014814\,P^2 + \\ &+ 1{,}05162\,Q_M + 0{,}104167\,(A+B)Q_M - 0{,}00017361\,\zeta Q_M + 0{,}020254\,Q_M{}^2.\end{aligned} \qquad (3)$$

Графічну інтерпретацію отриманої математичної моделі (3) представлено на рис. 2, а, б. З вищезгаданих рисунків і залежності (3) видно, що із збільшенням значень швидкості виведення молока Q_M, частоти пульсацій ζ і величини робочого вакуумметричного тиску Р збільшується і середнє квадратичне відхилення вакуумметричного тиску ΔР. Стосовно величини фази пульсацій А+В, можна стверджувати, що вона незначно впливає на флуктуацію вакуумметричного тиску ΔР. Тому в подальших експериментальних дослідженнях фазу пульсацій А+В зафіксуємо на регламентованій величині А+В = 0,6.



а б в

Рис. 2. Залежність зміни середнього квадратичного відхилення вакуумметричного тиску ΔР доїльного апарата одночасної дії від факторів дослідження при верхньому (а, б) та нижньому (в) молокопроводі

В результаті чисельного моделювання процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті одночасної дії при нижньому молокопроводі отримано розподіл вмісту рідини 1-α по довжині молочного шланга.

На відміну від підключення до верхнього молокопроводу, при нижньому підключені спостерігається незначна флуктуація вакуумметричного тиску ΔP = 0,59–2,27 кПа (рисунок 2, в), яка не залежить від величини фази А+В і вакуумметричного тиску Р:

$$\Delta P = 2{,}76713 - 0{,}072831\ \zeta + 0{,}00060787\ \zeta^2 + 0{,}0450231\ Q_M + 0{,}350405\ Q_M{}^2. \quad (4)$$

Для забезпечення однакового режиму контролю вакуумметричного тиску системою сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса необхідно, щоб швидкість його зміни була однаковою при збільшені та зменшені частоти обертання ротора насоса. Для забезпечення прийнятої умови необхідно, щоб режимні параметри ротаційного пластинчастого вакуумного насоса підпорядковувалися рівнянню (рис. 3):

$$\frac{\Delta Q_a(P_n, n+\Delta n)}{\Delta P} = \frac{\Delta Q_a(P_n, n-\Delta n)}{\Delta P}. \quad (5)$$

Закон збереження енергії для повітря, яке перебуває у вакуумному насосі, можна записати у вигляді диференційного рівняння:

$$dE/dt = \dot{m}_{in}h_{in} - \dot{m}_{out}h_{out} + \dot{U} - \dot{W}, \text{ або}$$

$$\frac{dT}{d\theta}\left(\rho V_p \frac{\partial u}{\partial T} + u V_p \frac{\partial \rho}{\partial T}\right) + \frac{dP}{d\theta}\left(\rho V_p \frac{\partial u}{\partial P} + u V_p \frac{\partial \rho}{\partial P}\right) - h_{in}\omega\frac{dm_{in}}{d\theta} + h_{out}\omega\frac{dm_{out}}{d\theta} = \frac{1}{\omega}\lambda_{conv}A_{conv}\left(T_{wall} - T_{gas}\right) - \left(P + \rho u\right)\frac{dV_p}{d\theta}, \quad (6)$$

де $E = \rho u V_p$ – енергія повітря у робочій камері вакуумного насоса, Дж; t – час, с; $\dot{m} = \omega \cdot dm/d\theta$ – масові витрати повітря, кг/с; h – ентальпія повітря, Дж/кг; $\dot{U} = \lambda_{conv}A_{conv}\left(T_{wall} - T_{gas}\right)$ – швидкість передачі тепла від повітря до корпуса насоса, Дж/с; $\dot{W} = \omega \cdot P \cdot dV/d\theta$ – швидкість зміни роботи повітря, Дж/с; $\rho = \rho(P,T)$ – густина повітря, кг/м^3; $u = u(P,T)$ – швидкість повітря, с; λ_{conv} – конвективний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м^2·К); A_{conv} – площа теплообміну, м^2; T_{wall} – температура корпуса, К; T_{gas} – температура повітря, К.

Закон збереження маси повітря, яке перебуває у вакуумному насосі, можна записати у вигляді диференційного рівняння:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}, \text{ або } \frac{dT}{d\theta}\left(V_p\frac{\partial\rho}{\partial T}\right) + \frac{dP}{d\theta}\left(V_p\frac{\partial\rho}{\partial P}\right) - \frac{dm_{in}}{dt} - \frac{dm_{out}}{dt} = -\rho\frac{dV_p}{d\theta} \quad (7)$$

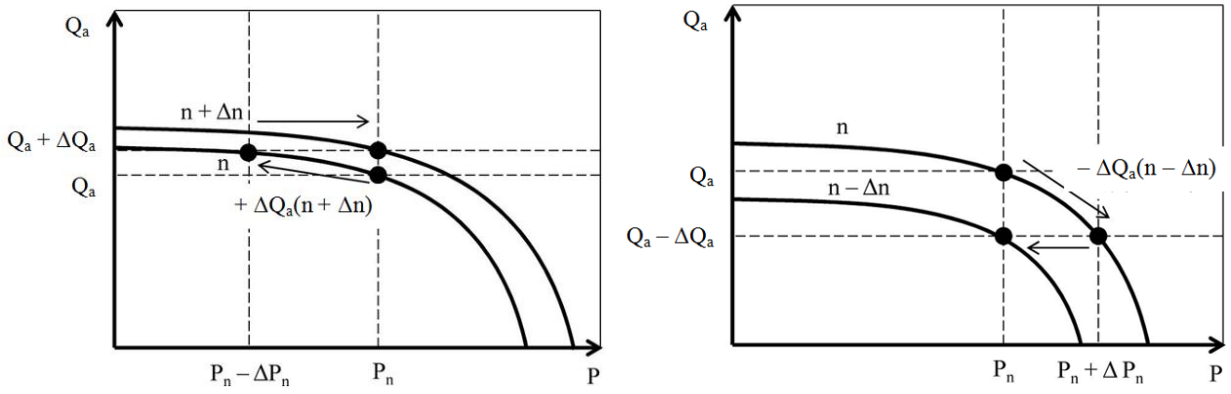


Рис. 3. Зміна режимних параметрів ротаційного пластинчастого вакуумного насоса під час роботи системи сервоконтролю

В процесі роботи ротаційного пластинчатого вакуумного насоса відбувається політропний процес. Приймаючи що повітря є ідеальним газом рівняння політропи можна записати у вигляді:

$$P = P_0 \cdot \left(V_{max} / V_p\right)^{\gamma}, \quad (8)$$

де $P_{0.}$ – вакуумметричний тиск газу на початку стиску, приймається рівним тиску всмоктування, Па; γ – показник політропи повітря.

Враховуючи прийняте припущення про ідеальний газ, рівняння стану повітря підпорядковується закону Менделєєва-Клапейрона:

$$PV_p = mRT / M, \quad (9)$$

де M – молярна маса повітря, кг/моль; R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К).

Спільний розв'язок диференційних рівнянь (5–9) аналітичними методами є дуже складною математичною задачею, тому вирішення вищезазначеної системи проведемо методом чисельного моделювання з використанням програмного пакету PumpLinx. Для проведення моделювання було побудовано сітку 3D моделі ротаційного пластинчастого вакуумного насоса з використанням генератора поверхневої сітки і багатогранних комірок. Базовий розмір комірки складав 0,001 м. Моделювання проводилось з використанням моделі роторного лопатного насоса. Рух повітря підпорядковувався турбулентному стану із можливою кавітацією. В початковий момент часу повітря в насосі знаходилося під атмосферним тиском – 101,325 кПа і температурою – 300 К. Діаметр статора складав D_p = 0,1716 м, діаметр ротора d_p = 0,146, довжина ротора L_p = 0,172 м, ексцентриситет m_p = 0,0128 м, товщина пластини δ_p = 0,005 м; число пластин Z_p = 4 (рис. 4).

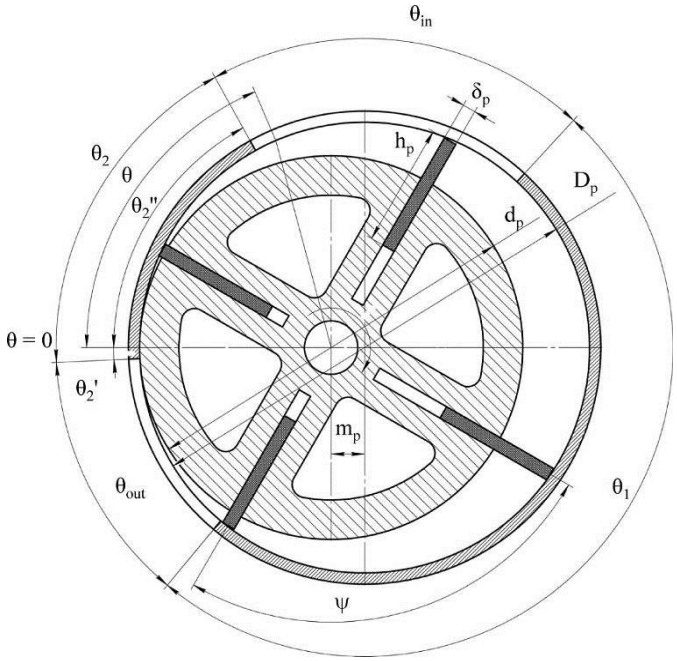


Рис. 4. Схема для визначення конструктивних параметрів ротаційного пластинчастого вакуумного насоса

В процесі моделювання змінювали геометричні розміри насоса, а саме фази розподілу повітря: кут всмоктування вакуумного насоса θ_{in} в межах від $\pi/6$ до $\pi/2$, кут стиску вакуумного насоса θ_1 в межах від $\pi/2$ до π, кут нагнітання вакуумного насоса θ_{out} в межах від $\pi/6$ до $\pi/2$ (дв. рис. 4). Частоту обертання ротора n змінювали від 0 до 3000 об/хв.

Визначення вакуумметричного тиску в заданих точках дало змогу отримати індикаторну діаграму вакуумного насоса (рис. 5), яка показує динаміку вакуумметричного тиску в його робочій камері.

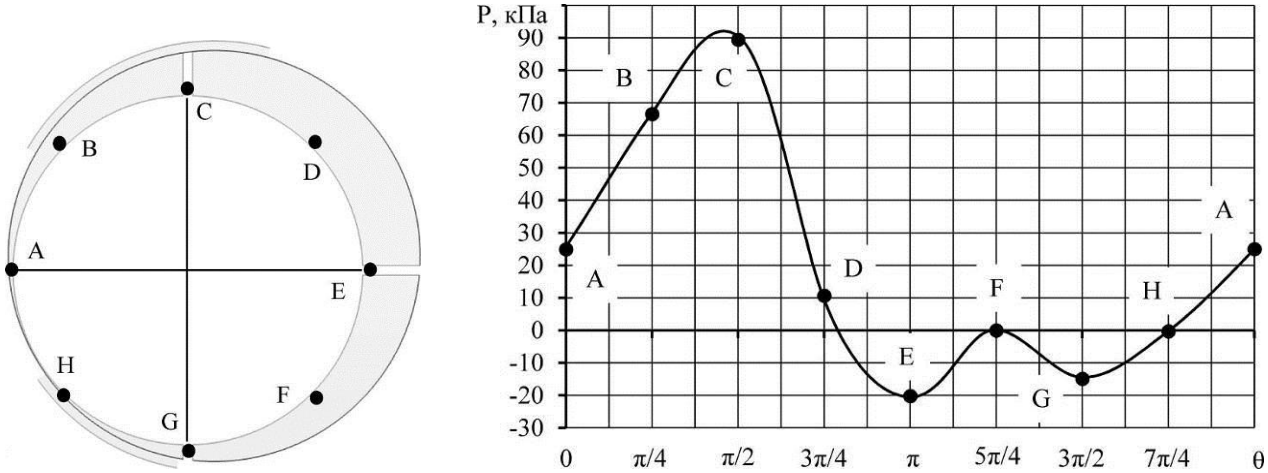


Рис. 5. Індикаторна діаграма вакуумного насоса (при θ_{in} = 1,22 (71 º), θ_1 = 3,09 (177 º), θ_{out} = 0,82 (47 º), n = 3000 об/хв.)

Режимною характеристикою вакуумного насоса є залежність зміни його продуктивності від вакуумметричного тиску, який він створює. Для ротаційного пластинчастого вакуумного насоса було отримано дану залежність при різних значеннях частоти обертання ротора (рис. 6).

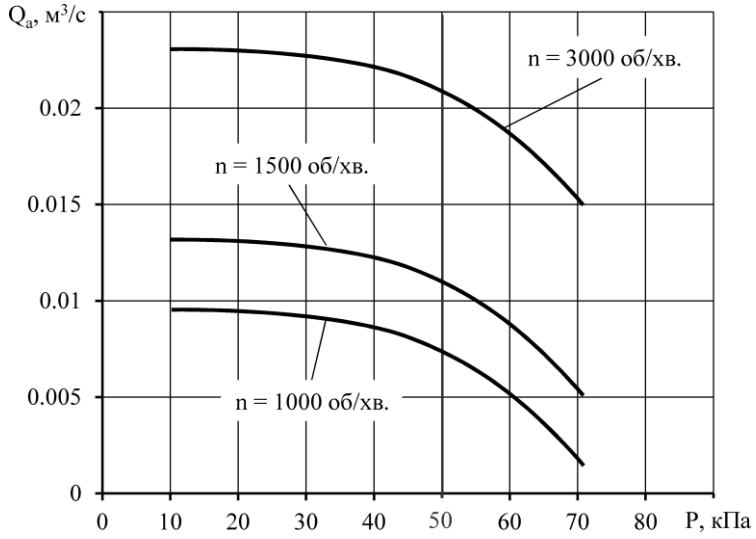


Рис. 6. Режимні характеристики ротаційного пластинчастого вакуумного

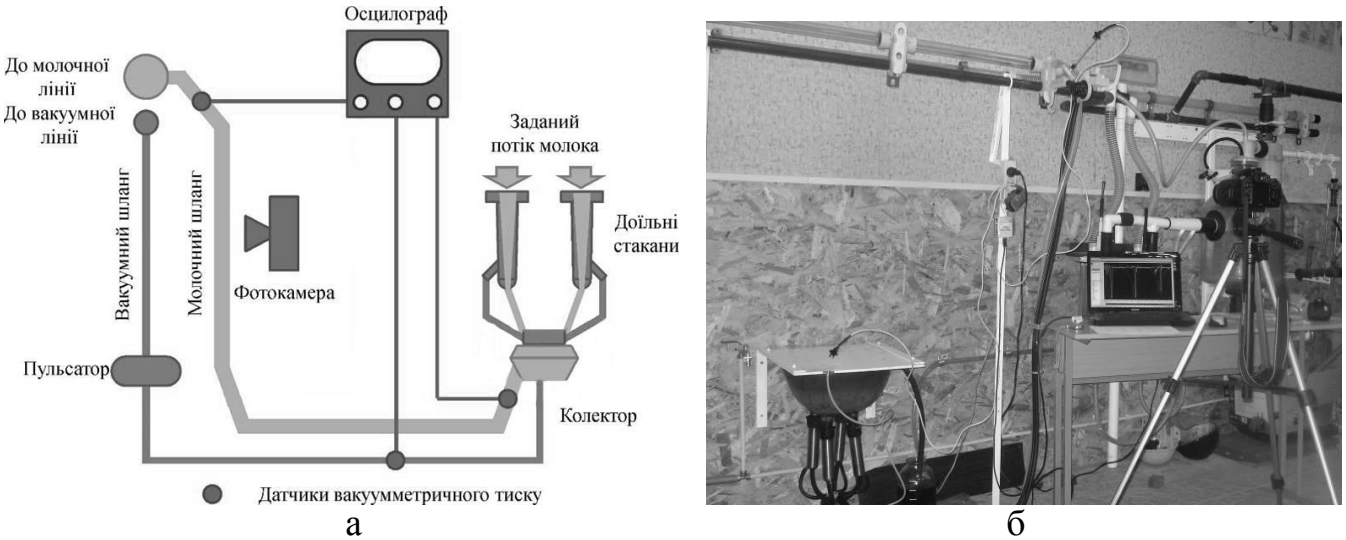
Варіюючи конструктивними параметрами вакуумного насоса, а саме фазами розподілу повітря, і підставляючи отримані значення вакуумметричного тиску і витрат повітря в рівняння (5) можна стверджувати, що раціональними є кут всмоктування θ_{in} = 1,22 (71 º), кут стиску θ_1 = 3,09 (177 º), кут нагнітання θ_{out} = 0,82 (47 º).

У третьому розділі **«Програма і методика проведення експериментальних досліджень»** викладено програму експериментальних досліджень, описано установки для проведення експериментальних досліджень та застосовано вимірювальне обладнання, наведено методики проведення досліджень та обробки

результатів експериментів. Програмою досліджень передбачено виконання наступних задач: дослідити процес переміщення молокоповітряної суміші в доїльних апаратах одночасної та попарної дії при підключені їх до верхнього та нижнього молокопроводів; провести дослідження конструктивно-режимних параметрів розробленого ротаційного пластинчатого вакуумного насоса із системою його сервоконтролю.

Для реалізації методики експериментальних досліджень процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті створено експериментальний стенд доїльної установки, який відповідає вимогам ISO 5707 і має точки для підключення реєструючої апаратури (рис. 7, а). На створеному стенді є можливість імітувати технологічний процес доїння на доїльних апаратах одночасної та попарної дії при підключені їх до верхнього та нижнього молокопроводів (рис. 7, б).

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 підключено датчики вакуумметричного тиску. 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 пульсацій. Дослідження процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті проводились за наступними факторами: робочий тиск вакуумної системи Р, кПа, частота пульсацій ζ, $хв^{-1}$, швидкість виведення молока $Q_М$, л/хв. Робочий тиск вакуумної системи регулювався вакуумрегулятором. Частота пульсацій регулювалася за допомогою регулятора на пульсаторі. Процес молоковіддачі імітувався на штучному вимені. Швидкість виведення молока з вимені змінювалася з використанням каліброваних жиклерів.



а б

Рис. 7. Схема підключення реєструючої апаратури (а) і загальний вид експериментального стенду доїльної установки із доїльним апаратом (б)

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 ΔР, кПа, режим течії молочно-повітряної суміші і продуктивність доїльного апарата q, л/хв. Динаміка вакуумметричного тиску вимірювалася 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. Об'єм рідини, що пройшла крізь доїльний апарат, визначався за допомогою вимірювальної ємності, а час – за допомогою секундоміра СОПпр-2а-3-000. Режим течії молочно-повітряної суміші визначався візуально с використанням фотокамери Nicon D3100 у режимі відеозйомки. Градуювання режимів течії молочно-повітряної суміші за James P. Brill є наступною: переривчаста, розподільна, роздільна і перехідна течії. Дослідження проводяться за D-оптимальним планом Бокса-Бенкіна другого порядку для 3 факторів. Рівні варіацій факторів були наступні: швидкість виведення молока Q_M – 0,4–2,0 л/хв; частота пульсацій ζ – 40-80 $хв^{-1}$; робочий тиск вакуумної системи Р – 45–55 кПа. Досліди проводяться із триразовою повторністю.

Експериментальні дослідження розробленого ротаційного пластинчатого вакуумного насоса проводилися на створеному за технологічною схемою (рис. 8, а) експериментальному стенді (рис. 8, 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.

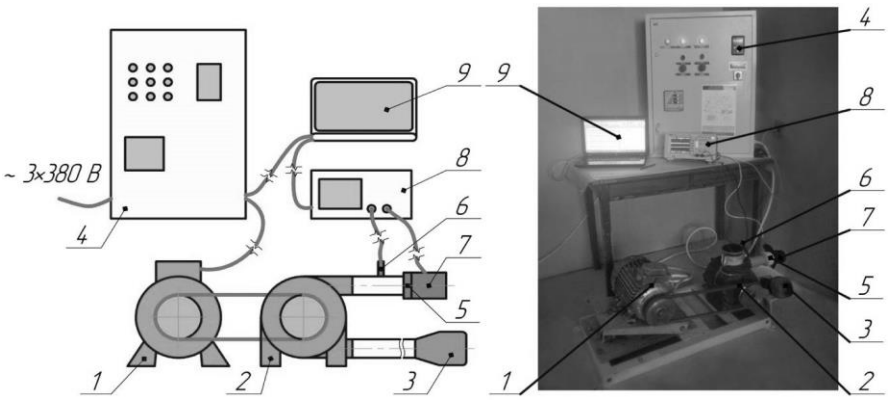


Рис. 8. Схема (а) та загальний вигляд (б) експериментального стенду для досліджень розробленого вакуумного насоса НВ-1200: 1 – асинхронний електродвигун; 2 – експериментальний зразок ротаційного пластинчатого вакуумного насоса НВ-1200; 3 – глушник; 4 – частотний регулятор Danfoss VLT MicroDrive; 5 – 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 (зміною площі впускного отвору S, $мм^2$) 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 багатофакторного 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 Р, кПа. Критеріями оцінки досліджень були: продуктивність вакуумного насоса Q_a, $м^3$/год, споживана потужність приводу вакуумного насоса N_p, кВт і флуктуація вакууму ΔР, кПа. 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 (рис. 8) 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, 135 л/хв. Критерієм оцінки ефективності функціонування алгоритму системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса є флуктуація вакууму ΔР і потужність його привода N_p.

У четвертому розділі **«Результати експериментальних досліджень»** представлено результати експериментальних досліджень і адекватність математичних моделей процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті, вплив режимних параметрів ротаційного пластинчатого вакуумного насоса на ефективність його експлуатації і результати експериментальних досліджень системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса.

Згідно результатів досліджень було створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на флуктуацію вакуумметричного тиску:

– для верхнього молокопроводу із доїльним апаратом одночасної дії:

$$\Delta P_{вмод} = 4{,}41875 - 0{,}031625\ \zeta + 0{,}0006\zeta^2 - 3{,}09375\,Q_м - \\ - 0.0101563\ Q_м\zeta + 0{,}089375\ Q_м P - 0{,}06\,P; \quad (10)$$

– для верхнього молокопроводу із доїльним апаратом попарної дії:

$$\Delta P_{вмпд} = -21{,}1898 + 1{,}65781\ Q_м - 0{,}278646\ Q_м^{\ 2} + 0{,}055\zeta - \\ - 0{,}000458333\zeta^2 + 0{,}728833\ P - 0{,}00683333\ P^2; \quad (11)$$

– для нижнього молокопроводу із доїльним апаратом одночасної дії:

$$\Delta P_{нмод} = 2{,}92625 + 0{,}328125\ Q_м^{\ 2} - 0{,}971875\ Q_м + \\ + 0{,}0178125\ Q_м\zeta - 0{,}078\zeta + 0{,}0006375\ \zeta^2; \quad (12)$$

– для нижнього молокопроводу із доїльним апаратом попарної дії:

$$\Delta P_{нмпд} = 0{,}6. \quad (13)$$

Також створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на продуктивність доїльного апарата:

– для верхнього молокопроводу із доїльним апаратом одночасної дії:

$$q_{вмод} = -13{,}6555 + 0{,}143555\ Q_м^{\ 2} + 0{,}0388125\ \zeta - 0{,}00032343\,8\zeta^2 - \\ - 1{,}30156\,Q_м + 0{,}0384375\ Q_м P + 0{,}53125\ P - 0{,}005525\ P^2; \quad (14)$$

– для верхнього молокопроводу із доїльним апаратом попарної дії:

$$q_{\text{вмпд}} = -2{,}14085 + 1{,}00734\,Q_{\text{м}} + 0{,}0465125\,\zeta - 0{,}000387604\,\zeta^2 + 0{,}015\,P; \quad (15)$$

– для нижнього молокопроводу із доїльним апаратом одночасної дії:

$$q_{\text{нмод}} = -18{,}5434 + 0{,}161784\,Q_{\text{м}}^{\,2} + 0{,}04125\,\zeta - 0{,}00038802\,1\zeta^2 - 1{,}91094\,Q_{\text{м}} + 0{,}0503125\,Q_{\text{м}}\,P + 0{,}744583\,P - 0{,}00775833\,P^2; \quad (16)$$

– для нижнього молокопроводу із доїльним апаратом попарної дії:

$$q_{\text{нмпд}} = -6{,}05594 - 0{,}134766\,Q_{\text{м}}^{\,2} + 0{,}009\,\zeta - 0{,}00009687\,5\zeta^2 + 0{,}378125\,Q_{\text{м}} + 0{,}0021875\,Q_{\text{м}}\zeta + 0{,}014375\,Q_{\text{м}}P + 0{,}229\,P - 0{,}00225\,P^2. \quad (17)$$

Згідно проведеного аналізу зоотехнічних вимог флуктуація вакуумметричного тиску не повинна перевищувати 2,5 кПа, при цьому продуктивність доїльного апарата повинна бути максимальною, тому для отримання раціональних значень факторів необхідно розв’язати систему рівнянь і нерівностей:

$$\begin{cases} \Delta P(Q_{\text{м}}, \zeta, P) < 2{,}5, \\ q(Q_{\text{м}}, \zeta, P) \to \max \\ 0{,}4 < Q_{\text{м}} < 2{,}0. \end{cases} \quad (18)$$

Розв’язком системи рівнянь і нерівностей (10–18) для всіх варіантів є залежності частоти пульсацій і робочого тиску вакуумної системи від швидкості виведення молока, графічну інтерпретацію яких представлено на рис. 9, окрім варіанту з верхнім молокопроводом із доїльним апаратом попарної дії рішенням якої є частота пульсацій $\zeta = 60$ хв$^{-1}$ і робочий тиск вакуумної системи $P = 54{,}9$ кПа.

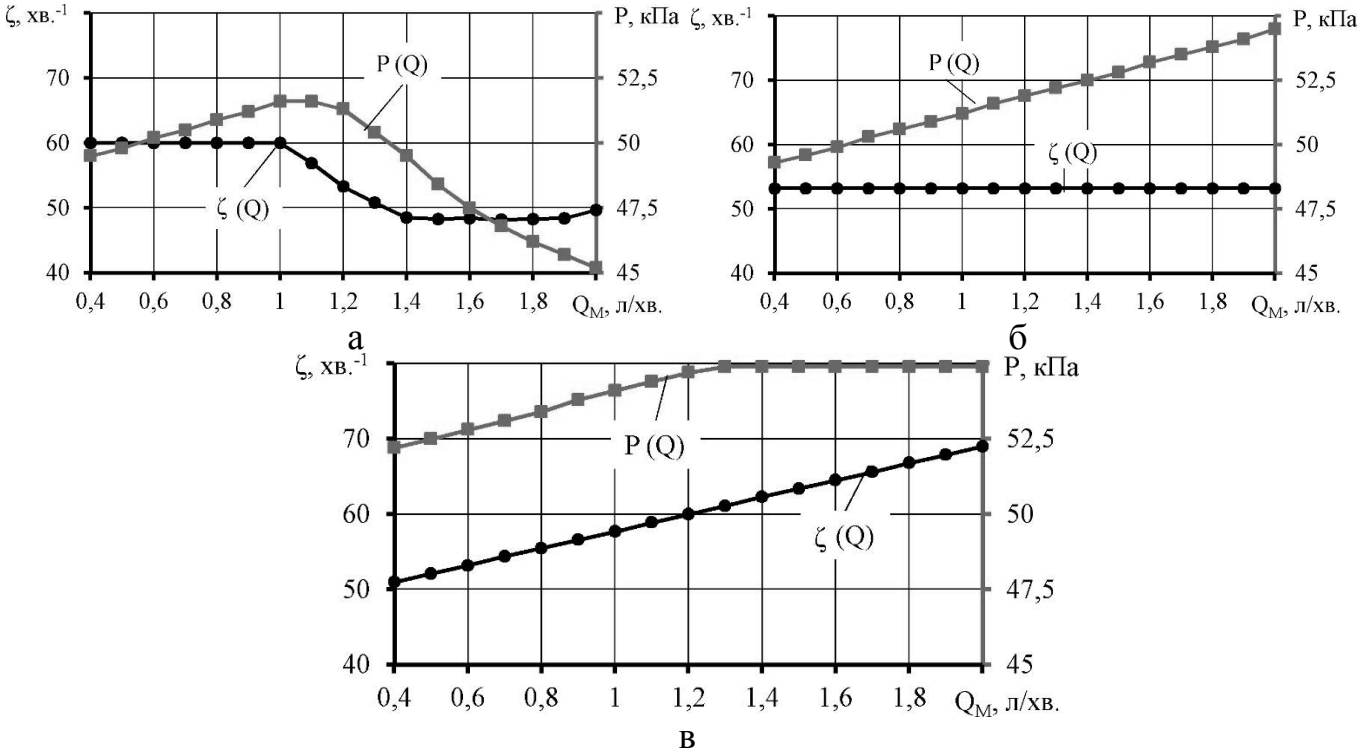


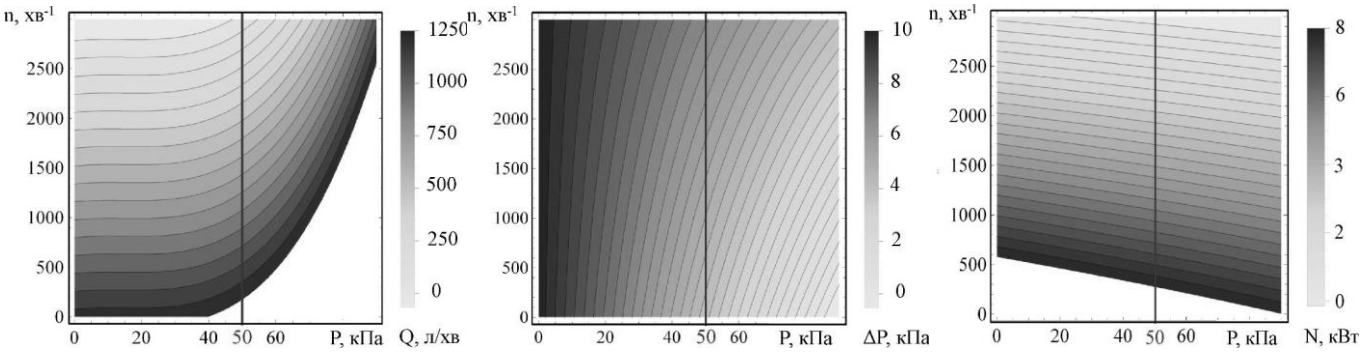
Рис. 9. Залежності частоти пульсацій ζ і робочого тиску P вакуумної системи від швидкості виведення молока Q_M: а) верхній молокопровід із доїльним апаратом одночасної дії; б) нижній молокопровід із доїльним апаратом одночасної дії; в) нижній молокопровід із доїльним апаратом попарної дії

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 ΔР між експериментальними і теоретичними даними в заданому діапазоні факторів складає 0,81 кПа, коефіцієнт кореляції – 0,92, а критерій Фішера становить 2,01 < $F_{табл}$ (0,05; 5; 30) = 2,53.

В результаті експериментальних досліджень робочого процесу розробленого ротаційного пластинчатого вакуумного насоса НВ-1200 створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на продуктивність вакуумного насоса (рис. 10, а):

$$Q_a = 44{,}5436 + 0{,}426725\,n - 1{,}56184\,P + 0{,}16936\,P^2 - 0{,}00266467\,P^3. \qquad (19)$$



а б в

Рис. 10. Вплив частоти обертання ротору n та величини вакуумметричного тиску Р на продуктивність вакуумного насоса Q_a (а), флуктуацію вакуумметричного тиску ΔР (б), споживану потужність приводу вакуумного насоса N_p (в)

Для флуктуації вакуумметричного тиску отримано математичну модель впливу досліджуваних факторів (рис. 10, б):

$$\Delta P = 0{,}087207 - 0{,}0000167177\,n + 0{,}104101\,P - 0.0000152404\,n\,P. \qquad (20)$$

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на споживану потужність привода вакуумного насоса має вигляд (рис. 10, в):

$$N_p = -1{,}78081 + 0{,}003086\,n + 0{,}01963\,P - 3{,}71\cdot 10^{-6}\,n\,P. \qquad (21)$$

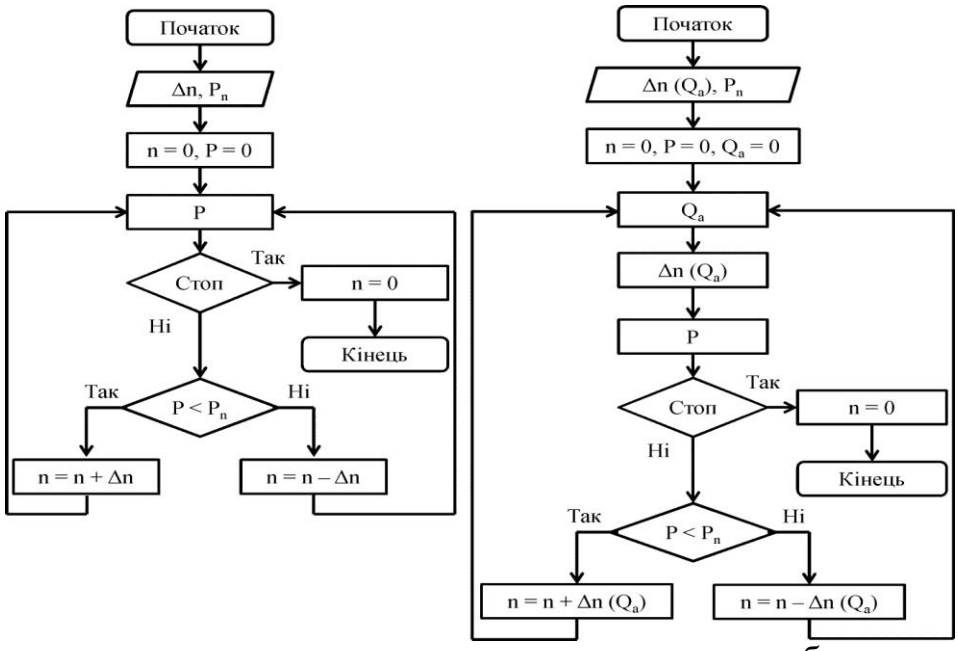
За розрахованими значеннями коефіцієнта кореляції 0,93–0,97 моделі є адекватними на заданому рівні довірчої ймовірності (0,95).

Сучасні системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса використовують загальноприйнятий алгоритм (рис. 11, а).

На основі результатів досліджень режимних і технологічних параметрів розробленого ротаційного пластинчатого вакуумного насоса НВ-1200 створено новий алгоритм системи його сервоконтролю (рис. 11, б), який відрізняється від загальноприйнятого можливістю розрахунку кроку варіювання частоти обертання ротора вакуумного насоса Δn (Q_a):

$$\Delta n = \left(Q_a - 44{,}5436 + 1{,}56184\,P - 0{,}16936\,P^2 + 0{,}00266467\,P^3\right)/0{,}426725. \qquad (22)$$

Згідно розробленої методики для запропонованих алгоритмів було отримано динаміку зміни вакуумметричного тиску Р і частоти обертання ротора вакуумного насоса n при зміні витрат повітря Q_a молочно-вакуумної системи доїльної установки (рис. 12, рис. 13). Аналіз залежностей (рис. 12) показав, що для загальноприйнятого алгоритму із збільшенням витрат повітря збільшується і флуктуація вакууму: при ΔQ_a = 45 л/хв – ΔР = 2,3 кПа, при ΔQ_a = 90 л/хв – ΔР = 4,6 кПа, при ΔQ_a = 135 л/хв – ΔР = 6,4 кПа. На відміну від загальноприйнятого алгоритму, розроблений забезпечує стабільний вакуумний режим, що підтверджується рисунком 13 – найбільша флуктуація вакууму складає ΔР = 2,4 кПа.



а б

Рис. 11. Загальноприйнятий (а) і розроблений (б) алгоритм системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса

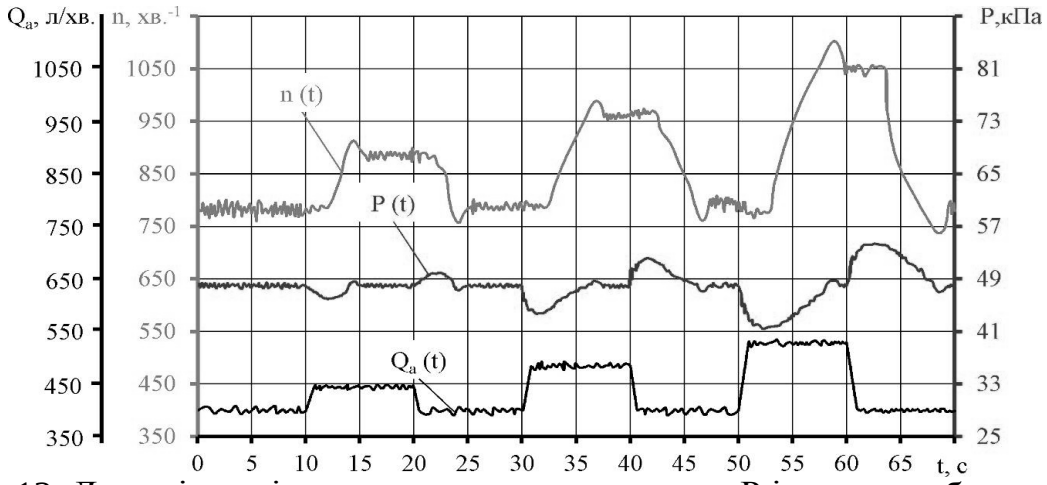


Рис. 12. Динаміка зміни вакуумметричного тиску P і частоти обертання ротора вакуумного насоса n при зміні витрат повітря Q_a молочно-вакуумної системи доїльної установки для загальноприйнятого алгоритму

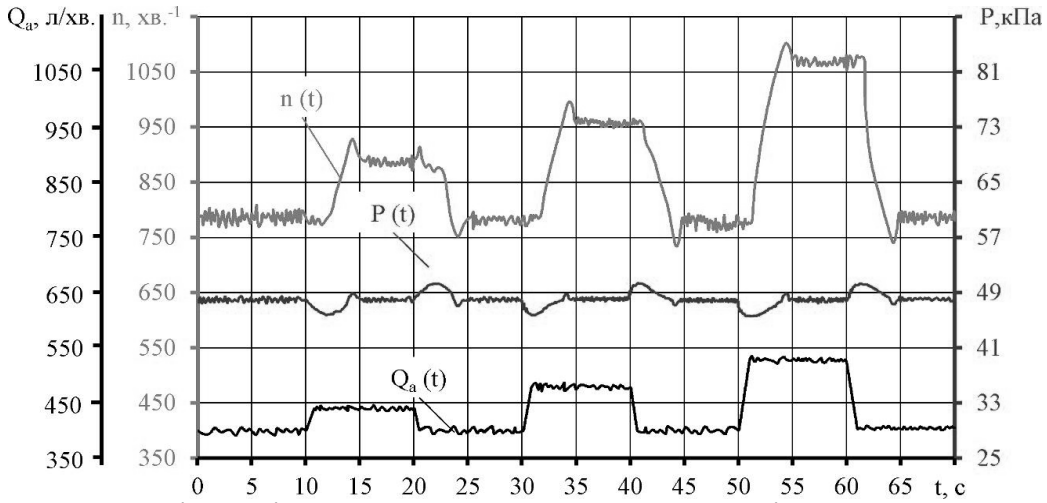


Рис. 13. Динаміка зміни вакуумметричного тиску P і частоти обертання ротора вакуумного насоса n при зміні витрат повітря Q_a молочно-вакуумної системи доїльної установки для розробленого алгоритму

У п’ятому розділі **«Реалізація результатів досліджень»** приведено розрахунок технологічних показників виконання процесу машинного доїння, техніко-економічне обґрунтування застосування системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки, впровадження результатів досліджень. В результаті розрахунку технологічних показників виконання процесу машинного доїння встановлено динаміку зміни потужності N_p електродвигуна вакуумного насоса для доїльних установок «Ялинка 2×6» із системою його сервоконтролю і без неї. Встановлені питомі витрати енергії на доїння однієї корови: без сервоконтролю – 0,2378 кВт·год/голову, із сервоконтролем – 0,0973 кВт·год/голову.

За результатами виробничої апробації системи сервоконтролю розробленого ротаційного пластинчатого вакуумного насоса НВ-1200 у складі доїльної установки «Ялинка 2×10» встановлено переваги за показниками енерговитрат – отримано економію електроенергії 21,3 %. За економічною оцінкою застосування на молочній фермі із поголів’ям 100 голів розробленої системи сервоконтролю дозволяє отримати річний економічний ефект 13264 грн при строку окупності 2,6 роки.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішено наукову задачу підвищення ефективності експлуатації доїльних установок. За результатами досліджень зроблено наступні висновки:

1. При сталих гідродинамічних параметрах руху молочно-повітряної суміші вакуумний насос повинен забезпечувати стабільний вакуумний режим 48,0 кПа, коливання вакуумметричного тиску в молочній і вакуумній системах не повинні перевищувати 2,5 кПа, що обумовлено зоотехнічними, санітарно-гігієнічними та технологічними вимогами. В результаті огляду існуючого конструктивно-технологічного забезпечення стабілізації вакуумного режиму доїльних установок обґрунтовано доцільність використання автоматизованої системи сервоконтролю ротаційного пластинчатого вакуумного насоса, яка дозволяє знизити енергоємність процесу доїння при збереженні необхідного рівня вакууму і ефективного резерву.

2. В результаті теоретичних досліджень та чисельного моделювання розроблено математичну модель руху молокоповітряної суміші, як двофазного середовища, молокопровідною лінією доїльного апарата, що зв’язала величину флуктуації вакуумметричного тиску ΔP, швидкість виведення молока Q_M, частоту пульсацій ζ і величину робочого вакуумметричного тиску P. Для верхньої молокопровідної системи спостерігається значна флуктуація вакуумметричного тиску ΔP = 1,01–4,78 кПа, яка перевищує регламентоване значення (2,5 кПа); для нижньої молокопровідної системи флуктуація вакуумметричного тиску складає ΔP = 0,62–1,82 кПа.

3. В результаті теоретичних досліджень та чисельного моделювання робочого процесу ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки із автоматичною системою його сервоконтролю, варіюючи його конструктивними параметрами, а саме фазами розподілу повітря, встановлено, що при куті всмоктування θ_{in} = 1,22 (71 º), стиску θ_1 = 3,09 (177 º) і нагнітання θ_{out} = 0,82 (47 º) забезпечується однаковий режим контролю вакуумметричного тиску P при збільшенні або зменшені витрат повітря Q_a за рахунок зміни частоти обертання ротора n.

4. В результаті експериментальних досліджень процесу переміщення молочно-повітряної суміші в доїльній установці з верхнім та нижнім молокопроводами встановлено залежності режимних параметрів доїльних апаратів одночасної та попарної дії (величина робочого тиску Р і частота пульсацій ζ) 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 ($q(Q_M, \zeta, P) \rightarrow \max$).

5. За результатами експериментальних досліджень встановлено 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.

6. За результатами виробничої апробації системи сервоконтролю розробленого ротаційного пластинчатого вакуумного насоса НВ-1200 у складі доїльної установки «Ялинка 2×10» встановлено переваги за показниками енерговитрат – економія електроенергії 21,3 %. За економічною оцінкою застосування на молочній фермі із поголів'ям 100 голів розробленої системи сервоконтролю дозволяє отримати річний економічний ефект 13264 грн при строку окупності 2,6 роки.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Линник Ю. Шляхи усунення дестабілізації вакуумного режиму доїльних установок / Ю. Линник // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. – 2014. – № 18 (32). – С. 278–283.

2. Линник Ю. О. Дослідження динаміки змін коливань вакуумметричного тиску в автоматизованій доїльній установці / **Ю. О. Линник**, С. І. Павленко, А. В. Грицун // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 1 (84). – С. 104–108. *(Здобувачу належить розрахунок динаміки зміни витрат повітря, вакуумметричного тиску в вакуум- і молокопроводі автоматизованої доїльної установки).*

3. Результати чисельного моделювання робочого процесу ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки / [**Линник Ю. О.**, Павленко С. І., Алієв Е. Б., Грицун А. В.] // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 2 (85). – С. 74–80. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання робочого процесу ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки).*

4. Линник Ю. Підвищення ефективності системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки / **Ю. Линник**, С. Павленко // Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. – 2014. – № 18. – С. 96–99. *(Здобувачу належить система рівнянь функціонування системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки).*

5. Павленко С. І. Методика експериментальних досліджень процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті / С. І. Павленко, Е. Б. Алієв, **Ю. О. Линник** // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2015. – Вип. 5. – Т. 2. – С. 167–172. *(Здобувачу належить розробка методики експериментальних досліджень).*

Стаття у науковому фаховому виданні України,
включеному до міжнародних наукометричних баз даних

6. Линник Ю. О. Техніко-економічне обґрунтування застосування системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки / Ю. О. Линник // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природовикористання України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 212. – Ч. 1. – С. 174–178.

Статті у наукових виданнях інших держав:

7. Линник Ю. А. Моделирование процесса перемещения молочно-воздушной смеси в доильной установке с верхним молокопроводом / **Ю. А. Линник**, С. И. Павленко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2014. – Вып. 48. – Т. 2. – С. 80–83. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання процесу переміщення молочно-повітряної суміші в доїльній установці з верхнім молокопроводом).*

8. Павленко С. И. Результаты численного моделирования процесса перемещения молочно-воздушной смеси в доильном аппарате / С. И. Павленко, Э. Б. Алиев, **Ю. А. Линник** // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. Серия: Механизация, автоматизация и машинные технологии в животноводстве. – 2014. – № 4 (16). – С. 77–81. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання процесу переміщення молочно-повітряної суміші в доїльному апараті).*

Статті в інших наукових виданнях України:

9. Линник Ю. О. Експериментальні дослідження режимних параметрів ротаційного пластинчастого вакуумного насоса НВ-1200 / **Ю. О. Линник**, С. І. Павленко, Е. Б. Алієв // Вісник Українського відділення міжнародної академії аграрної освіти. – 2014. – Вип. 2. – С. 136–141. *(Здобувачу належить розроблення методики, підготовка й проведення експериментальних досліджень та узагальнення їх результатів).*

10. Линник Ю. О. Розрахунок енерговитрат системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки / **Ю. О. Линник**, В. Ю. Дудін // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2015. – Вип. 45. – Ч. І. – С. 192–196 *(Здобувачу належить узагальнення отриманих даних).*

Патенти на корисну модель:

11. Патент на корисну модель 98052 Україна, МПК (2015.01) F04C 2/00. Вакуумний пластинчасто-роторний насос / **Ю. О. Линник**, С. І. Павленко, А. М. Пугач, В. Ю. Дудін; заявник і патентовласник Ю. О. Линник, С. І. Павленко, А. М. Пугач, В. Ю. Дудін. – № u201412960; заявлено 03.12.2014; опубліковано 10.04.2015; Бюл. № 7, 2015. *(Здобувачем запропоновано профіль поверхні пластин, що контактують з робочою порожниною ротора, виконати у вигляді кривої лінії).*

12. Патент на корисну модель 98053 Україна, МПК (2015.01) F04C 2/00. Вакуумний пластинчасто-роторний насос / **Ю. О. Линник**, С. І. Павленко, А. М. Пугач, В. Ю. Дудін; заявник і патентовласник Ю. О. Линник, С. І. Павленко, А. М. Пугач, В. Ю. Дудін. – № u201412961; заявлено 03.12.2014; опубліковано 10.04.2015; Бюл. № 7, 2015. *(Здобувачем запропоновано обладнати вакуумний насос автоматизованою системою сервоконтролю частоти обертання ротора).*

Тези наукових доповідей:

13. Линник Ю. О. Зниження енерговитрат ротаційних вакуумних насосів доїльних установок / **Ю. О. Линник**, С. І. Павленко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні системи і технології тваринництва // Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: Міжнародна науково-практична конференція, м. Харків, 21–24 березня 2014 року: матеріали конференції. – Х., 2014. – Вип. 144. – С. 145–151. *(Здобувачу належить проведення аналізу енерговитрат ротаційних вакуумних насосів доїльних установок і визначення шляхів їх зниження)*.

14. Линник Ю. А. Стабілізація вакуумметричного тиску доїльних установок / Ю. А. Линник // Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке: X-й международный форум молодежи, г. Харьков, 3–4 апреля 2014 года: тезисы доклада. – Х., 2014. – С. 32.

15. Линник Ю. А. Математическая модель движения молочно-воздушной смеси по молокопроводной линии доильной установки / **Ю. А. Линник**, Э. Б. Алиев, С. И. Павленко // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: Международная научно-техническая конференция, г. Минск, Республика Беларусь, 22–23 октября 2014 года тезисы доклада. – Минск, 2014. – Т. 3. – С. 181–185. *(Здобувачу належить розроблення математичної моделі переміщення молочно-повітряної суміші)*.

16. Моделювання роботи ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки / [Гаврильченко О. С., **Линник Ю. О.**, Черніков Р. С., Алієв Е. Б.] // Strategiczne pytania światowej nauki – 2015: XI Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji, 07–12 Lutego 2015 roku. – Przemyśl, 2015. – Vol. 19. Techniczne nauki – Str. 33–36. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання роботи ротаційного пластинчастого вакуумного насоса).*

17. Линник Ю. О. Експериментальні дослідження процесу переміщення молочно-повітряної суміші в доїльній установці з верхнім молокопроводом / **Ю. О. Линник**, В. Ю. Дудін, Е. Б. Алієв // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні системи і технології тваринництва // Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві: Міжнародна науково-практична конференція, м. Харків, 19–20 березня 2015 року: матеріали конференції. – Х., 2015. – Вип. 157. – С. 146–152. *(Здобувачу належить розроблення методики, підготовка й проведення експериментальних досліджень та узагальнення їх результатів)*.

18. Линник Ю. А. Проверка адекватности математических моделей процесса перемещения молоко-воздушной смеси в доильном аппарате / Ю. А. Линник // Инновационные технологии в производстве сельскохозяйственной продукции: Международная научно-практическая конференция, г. Минск, Республика Белорусь, 2–3 июня 2015 года: тезисы доклада. – Минск, 2015. – С. 551–555.

АНОТАЦІЯ

Линник Ю. О. Обґрунтування режимів роботи молочно-вакуумних систем доїльних установок. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського

виробництва. – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2016.

У дисертації вирішено наукову задачу підвищення ефективності експлуатації доїльних установок шляхом конструктивно-технологічного забезпечення процесу стабілізації вакуумного режиму. Виконано аналіз виробництва молока в господарствах України, зокрема сучасного технічного забезпечення молочних ферм. Представлено чинники і наслідки дестабілізації вакуумного режиму доїльних установок і проведено аналіз конструктивно-технологічного забезпечення процесу стабілізації вакуумного режиму і автоматичних систем сервоконтролю вакуумних насосів.

Розроблено математичну модель і проведено чисельне моделювання процесу переміщення молокоповітряної суміші по молокопровідній лінії доїльної установки. Створено математичну модель процесу функціонування системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса і проведено чисельне моделювання його робочого процесу. Викладено програму експериментальних досліджень, описано установки для проведення експериментальних досліджень та застосовано вимірювальне обладнання, наведено методики проведення досліджень та обробки результатів експериментів. Представлено результати експериментальних досліджень і адекватність математичних моделей процесу переміщення молокоповітряної суміші в доїльному апараті, вплив режимних параметрів ротаційного пластинчатого вакуумного насоса на ефективність його експлуатації і результати експериментальних досліджень системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса.

Приведено розрахунок технологічних показників виконання процесу машинного доїння, техніко-економічне обґрунтування застосування системи сервоконтролю ротаційного пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки.

Ключові слова: доїльна установка, вакуумна система, молочна система, вакуумний режим, молокоповітряна суміш, флуктуація, математична модель, ефективність, вакуумний насос, сервоконтроль.

АННОТАЦИЯ

Линник Ю. А. Обоснование режимов работы молочно-вакуумных систем доильных установок. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.11 – машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, 2016.

В диссертации решена научная задача повышения эффективности эксплуатации доильных установок путем конструктивно-технологического обеспечения процесса стабилизации вакуумного режима. Выполнен анализ производства молока в хозяйствах Украины, в частности современного технического обеспечения молочных ферм. Представлены факторы и последствия дестабилизации вакуумного режима доильных установок и проведен анализ конструктивно-технологического обеспечения процесса стабилизации вакуумного режима и автоматических систем сервоконтроля вакуумных насосов.

Разработана математическая модель и проведено численное моделирование процесса перемещения молочно-воздушной смеси по молокопроводной линии

доильной установки. Создана математическая модель процесса функционирования системы сервоконтроля ротационного пластинчатого вакуумного насоса и проведено численное моделирование его рабочего процесса. В результате численного моделирования процесса перемещения молочно-воздушной смеси в доильном аппарате одновременного и попарного действия при верхнем и нижнем молокопроводе получено распределение содержания жидкости по длине молочного шланга. Варьируя конструктивными параметрами вакуумного насоса, а именно фазами распределения воздуха, установлены рациональные значения углов всасывания, сжатия и нагнетания.

Представлено программу экспериментальных исследований, описаны установки для проведения экспериментальных исследований, приведены методики проведения исследований и обработки результатов экспериментов. Программой исследований предусмотрено выполнение следующих задач: исследовать процесс перемещения молочно-воздушной смеси в доильных аппаратах одновременной и попарно действия при подключении их к верхнему и нижнему молокопроводам; провести исследования конструктивно-режимных параметров разработанного ротационного пластинчатого вакуумного насоса в составе системы его сервоконтроля.

Представлены результаты экспериментальных исследований и адекватность математических моделей процесса перемещения молочно-воздушной смеси в доильном аппарате, влияние режимных параметров ротационного пластинчатого вакуумного насоса на эффективность его эксплуатации и результаты экспериментальных исследований системы сервоконтроля ротационного пластинчатого вакуумного насоса. На основе результатов исследований режимных и технологических параметров разработанного ротационного пластинчатого вакуумного насоса НВ-1200 создан новый алгоритм системы его сервоконтроля, который отличается от общепринятого возможностью расчета шага варьирования частоты вращения ротора вакуумного насоса.

Приведены расчет технологических показателей выполнения процесса машинного доения, технико-экономическое обоснование применения системы сервоконтроля ротационного пластинчатого вакуумного насоса доильной установки.

Ключевые слова: доильная установка, вакуумная система, молочная система, вакуумный режим, молочно-воздушная смесь, флуктуация, математическая модель, эффективность, вакуумный насос, сервоконтроль.

ANNOTATION

Linnik Yu. A. Substantiation the modes of work dairy milking machines with vacuum systems. – The Manuscript.

Dissertation for degree of candidate of technical sciences in specialty 05.05.11 – Machines and Means of Mechanization of Agricultural Production. – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kiev, 2016.

In dissertation research the improving the efficiency of operation of milking machines is by structural and technological support of the stabilization process of the vacuum mode. Have completed analysis of milk production in the farms of Ukraine, in particular, modern logistics of dairy farms. Have presented the factors and consequences of regime destabilization vacuum milking machines and analyzes structural and

technological support of the stabilization process of the vacuum mode and automatic servo control systems, vacuum pumps.

A mathematical model and a numerical simulation of the movement of milk-air mixture for milk-wire line milking plant. A mathematical model of the process of functioning of the system servo rotary vane vacuum pump and numerical modeling its workflow. Have presented the program of experimental research are described installation for experimental studies are presented methods of conducting research and processing of experimental results. The results of experimental studies and the adequacy of mathematical models of the process of moving milk-air mixture in the milking machine, the effect of regime parameters of the rotary vane vacuum pump on the efficiency of its operation and the results of experimental studies of the system servo rotary vane vacuum pump.

The calculations of technological parameters of a process of machine milking, a feasibility study for the use of servo control system of the rotary vane vacuum pump of the milking installation.

Key words: milking unit, vacuum system, the dairy system, the vacuum mode, milky-air mixture, fluctuation, mathematical model, efficiency, vacuum pump, servocontrol.

Підписано до друку 02.11.2016 р. Формат 60×80/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Обсяг 0,9 ум. друк. арк. Наклад. 100 прим. Зам. № 12/2016.

Типографія Дніпропетровського державного
аграрно-економічного університету, 2016
49600, м. Дніпро, вул. С. Єфремова 25,
тел. (056) 744-81-32