

# МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.313

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/01>**Поліщук М.М.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Ролік О.І.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДРОН ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРУ

У сучасній промисловості використовуються вертикальні трубопроводи великого діаметру різного виробничого та комунального призначення, наприклад такі, як димарі теплових електростанцій, шахти ядерних реакторів та їм подібні споруди. У теперішній час періодичне технічне обслуговування зазначених об'єктів виконується із залученням професійних альпіністів, що становить загрозу здоров'ю та життю людини. Альтернативою вирішення цієї проблеми може бути застосування безпілотних літальних апаратів, точніше дронів у вигляді квадрокоптерів або мультикоптерів. При виконанні різноманітних технологічних операцій, таких як діагностика внутрішніх поверхонь труб, їх очищення та нанесення захисних покриттів, механічна обробка та інших виробничих операцій, виникає проблема узгодження аеродинамічної тяги, що розвивається дроном, гравітаційних та допустимих технологічних навантажень. Вирішенню саме цього завдання присвячені справжні дослідження, які включають об'єкти інженерної та наукової новизни. До перших відносяться принципово нові конструктивні рішення дрону та його технологічного оснащення, до других – графоаналітичні залежності вказаних вище параметрів.

Основною перевагою запропонованого дрона є його здатність обслуговувати вертикальні трубопроводи великого діаметра, долаючи при цьому гравітаційне навантаження навіть при виконанні силових технологічних операцій. Дрон містить маніпулятор, встановлений на його платформі та пристрій періодичної фіксації на вертикальній поверхні трубопроводу у вигляді вакуумних захватів. У статті запропоновано модель дрону на основі рівнянь рівноваги квазістатистичного стану, внаслідок чого отримано аналітичні залежності для розрахунку параметрів функціонування дрону. Викладено результати моделювання співвідношень аеродинамічної тяги та допустимих технологічних навантажень. Основною мотивацією проведених досліджень є зниження вартості технічного обслуговування внутрішніх поверхонь вертикальних трубопроводів при одночасному виключенні праці людини та передачі їй лише функцій управління.

**Ключові слова:** безпілотні літальні апарати, квадрокоптер, моніторинг труб, аеродинамічна тяга, інформаційна система, керування дроном, моделювання.

**Постановка проблеми.** Не дивлячись на різноманіття сучасних моделей дронів у вигляді квадрокоптерів чи мультикоптерів, до тепер відсутні безпілотні літальні апарати, що здатні виконувати не тільки відеоспостереження чи діагностику промислових споруд, а й виконувати силові технологічні операції, що входять до переліку технічного обслуговування вертикальних труб великого діаметру. Крім конструктивних рішень вказаних апаратів, потрібно визначити аналітичні залежності співвідношень аеродинамічної тяги дрону

із силою утримання дрону на поверхні обробки та допустимих технологічних навантажень при виконанні дроном виробничих функцій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідникам та інженерам вже відомі приклади оригінальних конструкцій машин для технічного обслуговування трубопроводів. Як правило, такими машинами є мобільні роботи чи транспортні пристрої з дистанційним керуванням. Спеціально для діагностики та очищення трубопроводів, у тому числі і вертикальних, ство-

рено мобільний робот [1] під назвою Jetty Robot, оснащений гусеничною трансмісією, розміщеною на шарнірних паралелограмах, які дозволяють роботу обслуговувати трубопроводи діаметром до 1350 мм, що проте недостатньо для труб великого діаметра. Мобільний технологічний модуль [2, с. 362–364] здатний здійснювати технічне обслуговування вертикальних труб завдяки наявності еластичних тороїдальних камер, що знаходяться під тиском. Однак при використанні даного модуля для труб великого діаметру вказані еластичні камери стають занадто великими, що не виправдано з економічної точки зору. У роботі [3, с. 406–408] представлені нові технології та обладнання для діагностики внутрішніх поверхонь трубопроводів, що обслуговуються мобільними технологічними модулями, але без виконання силових технологічних операцій. Оригінальну конструкцію має апарат [4, с. 2–5] що складається з декількох секцій, які мають по два ступені свободи, утворюючи гнучкий корпус, який можна адаптувати для руху всередині труб, але без подолання гравітаційного навантаження по вертикалі.

Експериментальні дослідження [5, с. 74–77] підтверджують необхідність створення обладнання для профілактичного обслуговування таких вертикальних труб як димарі, тому що повністю уникнути процесу карбонізації та корозії арматури поки що не вдається. Особливий інтерес викликає мобільний робот [6, с. 12–14], створений для переміщення всередині вертикальних труб. Цей робот використовує пружні поршні, які притискають колеса до стінки труби для забезпечення тертя при вертикальному переміщенні. Крім того, цей робот має інструменти для виконання технологічних операцій з очищення димоходів, але невеликого діаметра. У статті [7] наголошується на тестуванні дрону Elios, створеному спеціально для обстеження таких висотних об'єктів як промислові димарі. Завдяки міцному каркасу зазначений дрон може стикатися з перешкодами на своєму шляху та продовжувати політ, залишаючись неушкодженим. Однак цей дрон призначений для діагностики та відеоспостереження висотних об'єктів, але не для виконання силових технологічних операцій. У Шотландії компанія з обслуговування комунальних мереж Scottish Water вперше у Великобританії стала використовувати дрони [8] для перевірки магістральних каналізаційних труб великого діаметру. Однак відсутність у таких дронів спеціального технологічного обладнання не дозволяє виконувати силові операції. Заслуговує

на увагу літаючий дрон [9, с. 2–4] для обстеження внутрішніх стінок трубопроводів, що містить транспортний пристрій із колісною трансмісією, та фотоапаратуру для зйомок ділянок внутрішніх поверхонь горизонтальних труб, наприклад, каналізаційних. Але не спроможність цього комплексу обладнання до технічного обслуговування вертикальних труб обмежує його технологічні можливості. На відміну від розглянутих вище розробок дрон [10, с. 3] для миття поверхонь, крім повітряних гвинтів з двигунами, містить щітку для миття поверхонь, водяну помпу із приєднаними до неї шлангами, що з'єднані також із цистернами з рідиною, а також систему керування с датчиками відстані. Однак відсутність можливості виконання силових операцій технічного обслуговування поверхонь споруд обмежує технологічні можливості цього дрону тільки операціями очищення.

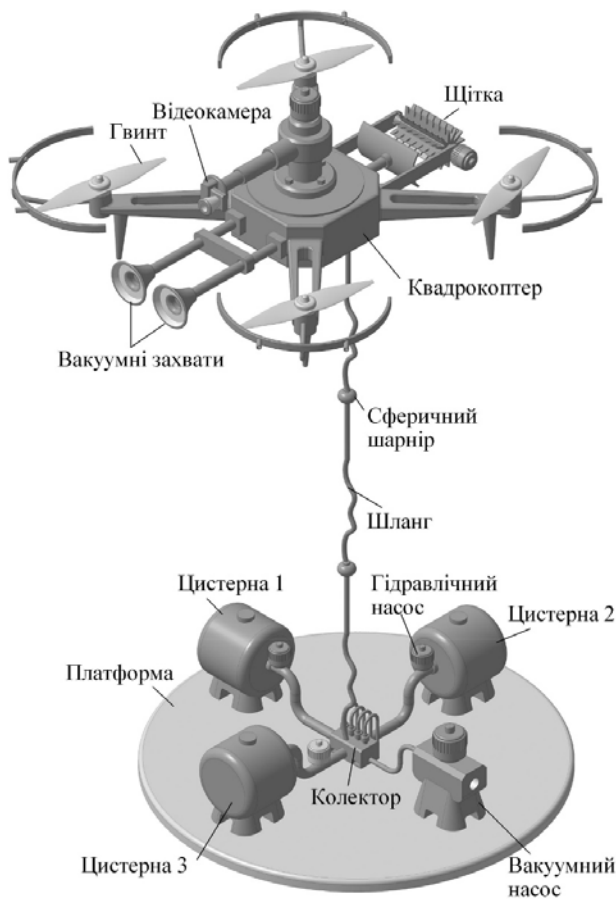
Таким чином, аналіз розглянутих вище досліджень та технічних рішень показує, що проблема створення безпілотних летальних апаратів для технічного обслуговування вертикальних труб великого діаметра залишається актуальною.

**Постановка завдання.** Необхідно створити дрон у вигляді квадрокоптера, який був би спроможний здійснювати технічне обслуговування вертикальних труб великого діаметру, виконуючи не тільки операції очищення поверхонь труб та нанесення захисних покриттів, а й також силові технологічні операції механічної обробки поверхонь труб. Також для надійного функціонування такого дрону необхідно розробити аналітичні залежності узгодження аеродинамічної тяги, що розвивається гвинтами дрону, із силою утримання дрону на поверхні обробки та допустимими технологічними навантаженнями.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**  
*Конструкція дрону.* Для кращого розуміння запропонованої нижче аналітичної моделі спочатку розглянемо принципово нову конструкцію [11, с. 6–7] дрону, що представлений на рис. 1, та процес його функціонування. Дрон містить квадрокоптер з гвинтами та їх приводи від електродвигунів. На корпусі квадрокоптера встановлено маніпулятор для виконання технологічних операцій, вакуумні захвати для фіксації дрона на поверхні обслуговування, приводну щітку для очищення поверхні труби та відеокамеру на руці маніпулятора.

Технологічне оснащення дрону з'єднано зі стаціонарним обладнанням, що розміщено на платформі, через гнучкий шланг з герметичними сферичними шарнірами (для запобігання перекручування шлангу) та колектор, який перемика-

ється за командами оператора залежно від виду технологічної операції. До складу стаціонарного обладнання входять вакуумний насос для вакуумних захватів, цистерна 1, також з вакуумним насосом для збору відходів очищення поверхні труб за допомогою приводної щітки, цистерна 2 для подачі миючої рідини гідравлічним насосом, а також цистерна 3 для подачі технічного розчину в екструдер, що встановлений на руці маніпулятора.

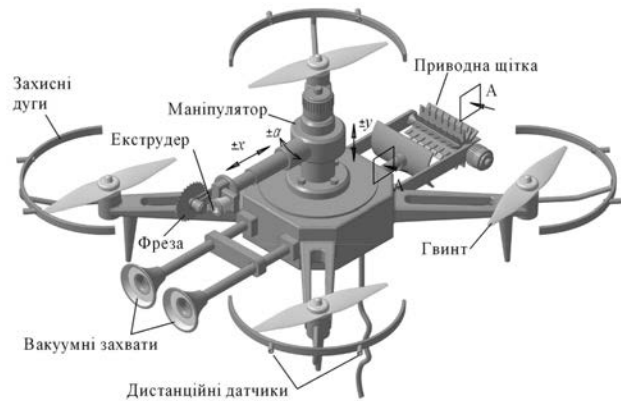


**Рис. 1. Дрон для технічного обслуговування вертикальних труб**

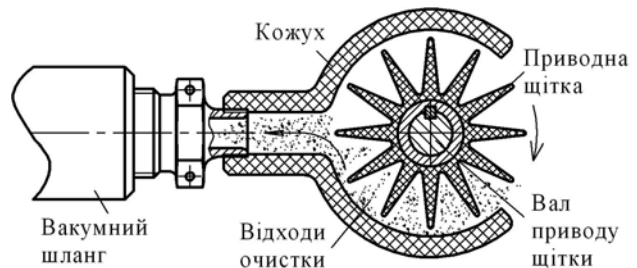
Маніпулятор квадрокоптера має три ступені волі, а саме поступальні переміщення (рис. 2): горизонтальне  $\pm x$  та вертикальне  $\pm y$ , а також обертальне переміщення  $\pm \alpha$ . На кисті руки маніпулятора встановлено приводну дискову фрезу та екструдер, через який подається технічний самотвердіючий розчин для ремонту тріщин на поверхнях вертикальних труб. Дистанційні датчики, що встановлені на захисних дугах гвинтів, призначені для контролю мінімально допустимого відстані наближення квадрокоптера до поверхні обслуговування.

Також квадрокоптер оснащений приводною щіткою для очищення поверхонь труб, поперечний переріз якої показано на рис. 3. До кожуху щітки

приєднано шланг, через який вакуумним насосом висмоктуються відходи очищення поверхонь труб для їх збирання в цистерні 1 (див. рис. 1).



**Рис. 2. Квадрокоптер для обслуговування вертикальних труб**



**Рис. 3. Приводна щітка для очищення поверхонь (див. переріз А-А на рис. 2)**

Таким чином, дрон оснащений всім необхідним обладнанням для технічного обслуговування вертикальних труб великого діаметру. У початковому стані дрон на своїх опорах знаходиться на платформі, розміщеної в середині труби великого діаметру. Залежно від виробничого завдання та за командами оператора (або заздалегідь розробленої програми) дрон виконує різні технологічні операції. У разі очищення внутрішньої поверхні труби до дрону приєднується відповідний трубопровід, а колектор (рис. 1) перемикається на цистерну 1 з вакуумним насосом. Дрон злітає і наближається до поверхні труби, після чого вмикається привід щітки. Керований оператором або відповідною програмою за певним алгоритмом дрон очищає щіткою поверхню труби, а відходи очищення поверхні труби, що обслуговується, через кожух (рис. 3) та гнучкий шланг висмоктуються насосом у відповідну цистерну.

У разі необхідності ремонту (тобто закладення розчином) тріщин на поверхні труби дрон сканує поверхню труби відеокамерою і при цьому записуються координати тріщин. Після чого дрон направляється до поверхні з тріщиною і за допомогою вакуумних захватів (рис. 2) зчіплюється з поверхнею труби. При цьому залежно від

величини зусилля операції різання при обробці тріщин, приводи гвинтів можуть бути вимкнуті або включені в режимі малих частот обертів пропелерів для часткової компенсації гравітаційного навантаження. Після зчеплення дрону вакуумними захватами з поверхнею труби вмикаються приводи маніпулятора з телескопічною рукою і фрези, якою обробляється контур тріщини на поверхні труби для подальшого заповнення тріщини розчином, який має здатність до затвердіння за певний час.

Після заміни трубопроводу і перемикавання колектора на цистерну 3 (див. рис. 1) з технічним розчином, насосом під тиском подається в екструдер технічний розчин для заповнення тріщини. У разі необхідності миття поверхні труби колектор перемикається на цистерну 2, з якою гідравлічним насосом подається рідина для миття поверхонь труб великого діаметру. Перемикавання колектора залежно від технологічної функції надає можливість використання різноманітного стаціонарного обладнання. При виконанні усіх операцій герметичні сферичні шарніри, що встановлені на шлангу, запобігають перекручуванню гнучкого шлангу, секції якого можуть повертатися на довільний кут.

*Побудова статичної моделі.* Оскільки при технологічних навантаженнях, тобто при виконанні силових операцій, наприклад, таких як механічна обробка, свердління, клепка, встановлення дюбелів й т.п., здійснюється фіксація дрону на поверхні труби вакуумними присосами, то вкрай потрібно записати умови втримання дрону на поверхні труби, а точніше розробити аналітичні залежності узгодження аеродинамічної тяги, що розвивається гвинтами дрону, із силою утримання дрону на поверхні обробки та допустимими технологічними навантаженнями. На рис. 4 показана схема сил та реакцій, що діють на квадрокоптер при його навантаженні. Під час виконання технологічної операції (наприклад, механічної обробки фрезою тріщини або зчищення нашарування на стінці труби) квадрокоптер разом з технологічним оснащенням будемо уважати одним твердим тілом певної маси.

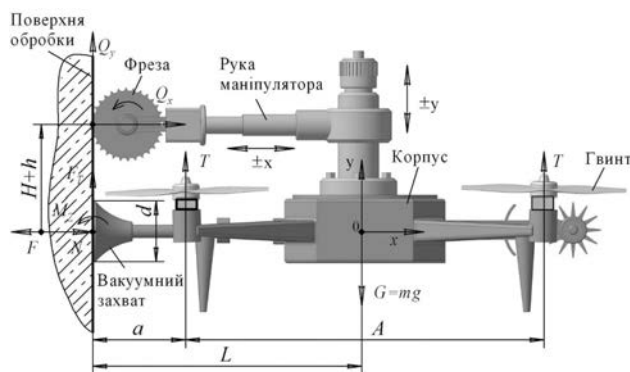


Рис. 4. Схема сил та реакцій, діючих на тіло квадрокоптера

Початок системи координат  $Oxyz$  виберемо посередині відрізка, який сполучає центри двох присосів вакуумних захватів, за допомогою яких тіло утримується на поверхні обробки. Як видно зі схеми рис. 4, вісь  $Oy$  напрямлена вертикально вгору, вісь  $Ox$  напрямлена вправо по горизонталі, вісь  $Oz$  перпендикулярна до площини  $Oxy$ . На тіло (тобто на квадрокоптер разом з оснащенням) буде діяти така система зовнішніх сил: сила ваги  $G=mg$  ( $g=9,8\text{м/с}^2$  – прискорення земного тяжіння) напрямлена вертикально донизу; підйомна сила (аеродинамічна тяга)  $T$  одного гвинта квадрокоптера (таких сил чотири і усі вони напрямлені вертикально вгору). Ця сила у залежності від кутової швидкості гвинтів квадрокоптера може змінюватися у широких межах. Наприклад у спеціально призначених для квадрокоптерів популярних двигунів моделі KV120 (виробник T-MOTOR) в діапазоні кутової швидкості 2548...4742 об/хв. аеродинамічна тяга змінюється в межах  $55\text{Н} < T < 204\text{Н}$ . Сила  $Q_x$  – притискання фрези до поверхні обробки, напрямлена паралельно до вісі  $Ox$ ; сила  $Q_y$  – різання фрезою поверхні обробки, напрямлена уздовж вісі  $Oy$ . Сила  $F$  одного присосу вакуумного захвату визначається за формулою:

$$F = SK_s(p_a K_a - p_z)K, \quad (1)$$

де  $S$  – площа, обмежена внутрішнім контуром присоса ( $\text{м}^2$ ),  $S = \pi d^2 / 4$ ;  $d = (0,1...0,3)$ , м – діаметр зони вакуумування;  $K_s$  – коефіцієнт зменшення площі присоса внаслідок деформації ущільнення ( $K_s = 0,95$ ) для ущільнень пористих гум);  $p_a = 101 \times 10^3$  (Па) – атмосферний тиск;  $p_z = 50 \times 10^3$  (Па) – залишковий тиск всередині камери (глибина вакууму);  $K_a$  – коефіцієнт, яким ураховують зміни атмосферного тиску ( $K_a = 0,9$ );  $K$  – коефіцієнт, яким ураховують приплив повітря у місці контакту ущільнення камери присоса з поверхнею об'єкта ( $K = 0,85$ ). Тобто для діапазону діаметрів присосу  $d = 0,1...0,3\text{м}$  сила одного присосу складає 257...2311 Н, відповідно для двох вакуумних захватів: 514...4622 Н. Сили  $F$  від вакуумних захватів напрямлені протилежно до вісі  $Ox$ .

Уздовж контуру присосу діаметром  $d$  з боку поверхні обробки діє розподілене погонне зусилля  $q(\beta)$ , яке наближено можна подати у вигляді

$$q(\beta) = B - C \sin(\beta), \quad 0 < \beta < 2\pi \quad (2)$$

де  $B = \frac{N}{\pi d}$ ;  $C = \frac{4M_z}{\pi d^2}$ ;  $N$  – головний вектор зусиль  $q(\beta)$  (нормальна реакція паралельна до вісі  $Ox$ );  $M_z$  – момент зусиль  $q(\beta)$  відносно вісі  $Oz$ .

З формули (2) видно, що при  $C \geq B$ , тобто при  $M_z \geq Nd / 4$  порушується герметичність присосу

вакуумного захвату. У місці контакту присосів з поверхнею труби ще виникають сили тертя  $F_T$ , які паралельні до вісі  $Oy$  (див. рис. 4). Як відомо, у загальному випадку для твердого тіла можна скласти 6 рівнянь рівноваги. Але, у даному випадку, усі сили паралельні до площини  $Oxy$  і має місце силова симетрія відносно цієї площини, то для забезпечення статичної визначеності достатньо скласти лише три рівняння рівноваги, а інші три рівняння задовольняються тотожно. З урахуванням дії сил, показаних на рис. 4, система рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{k=n} (F_k)_x = 0; & 2N - 2F + Q_x = 0, \\ \sum_{k=1}^{k=n} (F_k)_y = 0; & 4T - G + Q_y + 2F_T = 0, \\ \sum_{k=1}^{k=n} (F_k)_z = 0; & 2Ta + 2T(a + A) - GL - Q_x(H + h) + 2M_z = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де позначення відстань  $A$ ,  $a$ ,  $H$  та  $h$  див. на рис. 4.

Для останнього рівняння моментів із системи (3) можна записати так:

$$(4T - G)L - Q_x(H + h) + 2M_z = 0 \quad (4)$$

З рівнянь (3) та (4) знаходимо: значення нормальній реакції

$$N = F - Q_x / 2; \quad (5)$$

сили тертя

$$F_T = (G - 4T - Q_y) / 2, \quad (6)$$

та значення моменту навколо вісі  $z$

$$M_z = ((G - 4T)L + Q_x(H + h)) / 2 \quad (7)$$

Щоб не було проковзування присосів під дією технологічного навантаження сили тертя повинні задовольняти умові

$$\begin{aligned} F_T < \mu_1 N &= \mu_1 (F - Q_x / 2); \\ F_T > -\mu_1 N &= -\mu_1 (F - Q_x / 2), \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\mu_1 = 0,2 \dots 0,5$  – коефіцієнт тертя ковзання матеріалу присосу і робочої поверхні. Надалі, будемо вважати, що  $Q_y = \mu_2 Q_x$  ( $\mu_2 = 0,7 \dots 0,8$ ). Підставляємо вираз (6) у (8) і отримаємо дві нерівності відносно сили  $Q_x$

$$(\mu_2 - \mu_1)Q_x > G - 4T - 2\mu_1 F; \quad Q_x < \frac{2\mu_1 F_T + G - 4T}{\mu_2 + \mu_1}. \quad (9)$$

Перша нерівність з виразів (9) виконується завжди. Щоб не було розгерметизації вакуумних присосів момент  $M_z$  повинен задовольняти умові

$$\begin{aligned} M_z < \frac{Nd}{4} &= \frac{d(F - Q_x / 2)}{4}; \\ \text{або } M_z > -\frac{Nd}{4} &= -\frac{(F - Q_x / 2)d}{4}. \end{aligned} \quad (10)$$

Підставляємо вираз (7) у (10) і отримаємо дві нерівності відносно сили притискання фрези до

поверхні обробки  $Q_x$ , тобто шукане обмеження сили технологічного навантаження:

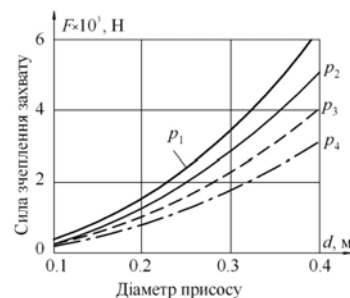
$$Q_x < \frac{(4T - G)L + dF / 2}{H + h + d / 4}. \quad (11)$$

$$Q_x > \frac{(4T - G)L - dF / 2}{H + h - d / 4}. \quad (12)$$

**Моделювання системи.** Моделювання параметрів функціонування квадрокоптера здійснювалось при початкових умовах: сили аеродинамічної тяги одного гвинта  $T_{\min} = 55$  Н;  $T_{\max} = 204$  Н (всього гвинтів чотири); ваги квадрокоптера  $m = 18$  кг; гравітаційної сили  $G = m \cdot 9,8$  Н; коефіцієнтів тертя  $\mu_1 = 0,3$ ;  $\mu_2 = 0,8$ ; значення відстані від осі присосу вакуумного захвату до осі маніпулятора  $H = 0,5$  м; довжина пиляння фрезою  $h = 0,3$  м; відстань від центра ваги квадрокоптера до поверхні обробки  $L = 1,25$  м; відстань від поверхні обробки до вісі першого гвинта  $a = 0,5$  м (див. рис. 4).

На рис. 5 представлені графіки залежності сили зчеплення одного вакуумного захвату від діаметру присосу, при різних промислово придатних значеннях залишкового тиску (глибини вакууму)  $p_1 \dots p_4$  під присосом захвату. Наприклад, порівнюючи значення сили зчеплення  $F$  (рис. 5) при глибині вакууму  $p_1 = 40 \cdot 10^3$  Па з припустимими значеннями технологічного навантаження (див. зафарбовану дільницю на рис. 6 та рис. 7), стає очевидним, що для надійного утримання квадрокоптера на поверхні обробки достатньо двох присосів при їх діаметрах в діапазоні значень  $d = (0,2 \dots 0,25)$  м. У разі збільшення технологічного навантаження  $Q_x$ , як це показано на рис. 8, слід збільшити діаметри двох присосів до  $d = 0,3$  м.

Одночасно слід враховувати величину аеродинамічної тяги  $T$  одного гвинта квадрокоптера (а їх, як відомо, чотири). На графіках рис. 6–8 зафарбованими дільницями показані зони припустимого робочого технологічного навантаження, де штрихова лінія відповідає формулі (9), штрихпунктирна – формулі (11), а суцільна лінія – формулі (12).



**Рис. 5.** Залежність сили зчеплення вакуумного захвату від діаметру присосу при глибині вакууму:  $p_1 = 40 \cdot 10^3$  Па;  $p_2 = 50 \cdot 10^3$  Па;  $p_3 = 60 \cdot 10^3$  Па;  $p_4 = 70 \cdot 10^3$  Па

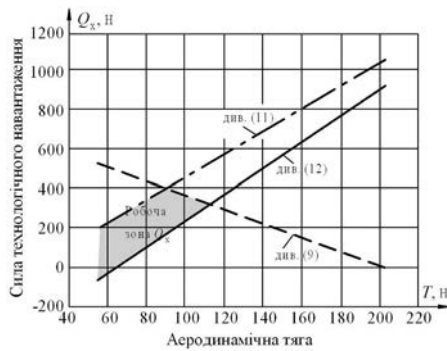


Рис. 6. Залежність сили технологічного навантаження від аеродинамічної тяги при  $d=0.2$  м

Таким чином, робоче значення технологічного навантаження  $Q_x$  потрібно вибирати завжди нижче і штрихової лінії, і штрих-пунктирної лінії, але вище суцільної лінії. Звичайно, що завжди  $Q_x > 0$ , навіть коли квадрокоптер виконує мало навантажених операцій, наприклад такі як очищення поверхні чи нанесення захисних покриттів.

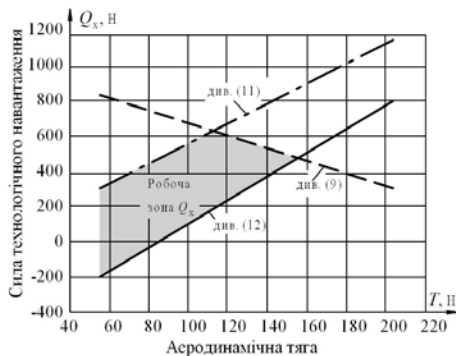


Рис. 7. Залежність сили технологічного навантаження від аеродинамічної тяги при  $d=0.25$  м

Наведені графоаналітичні залежності можуть використовуватись дослідниками та інженерами при створенні дронів спеціального призначення. У разі зміни початкових даних, вони можуть бути внесені у відповідні формули (9), (11) та (12). При цьому зміняться тільки чисельні результати розрахунку параметрів, а характер залежностей залишиться сталим.

#### Список літератури:

1. Robot for diagnostics and cleaning of pipelines JettyRobot. Internet resource. URL: <https://www.jettyrobot.com/> (date of the application 20.02.2022).
2. M. Polishchuk, V. Yahlinskyi. Mobile Technology Module for Pipeline Maintenance: Design and Simulation. FME Transactions. Volume 50, No 2, 2022, pp. 360–368.
3. Tiehua Hu, Jingbo Guo. Development and application of new technologies and equipment for in-line pipeline inspection. Natural Gas Industry B, Volume 6, Issue 4, 2019, Pages 404-411, ISSN 2352-8540.

<sup>1</sup> Дослідження виконувались у межах проекту Національного фонду досліджень України № 2023.04/0077 «Дрон для забору проб води».

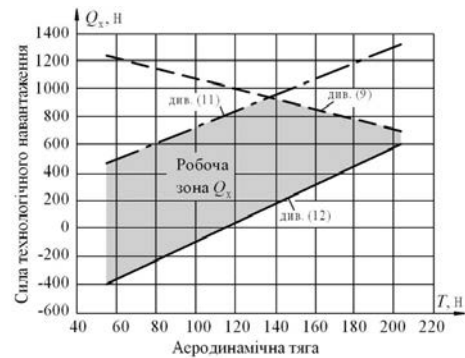


Рис. 8. Залежність сили технологічного навантаження від аеродинамічної тяги при  $d=0.3$  м

**Висновки.** В результаті проведених досліджень, створено принципово нову конструкцію дрона для технічного обслуговування вертикальних труб великого діаметру, який здатний виконувати не тільки моніторинг стану труб, а й силові технологічні операції механічної обробки поверхонь обслуговування. Принциповою відмінністю запропонованого дрону є наявність пристроїв періодичного утримання дрону на поверхні обробки у вигляді вакуумних захватів та маніпулятора, встановлених на корпусі квадрокоптера для виконання технологічних операцій.

Побудована аналітична модель функціонування квадрокоптера у вигляді рівнянь квазістатичного стану дозволяє дослідникам та інженерам розраховувати параметри функціонування подібних безпілотних літальних апаратів.

Надані графоаналітичні залежності дозволяють визначати чисельні співвідношення аеродинамічно тяги, що створюють гвинти квадрокоптера, із силою періодичної фіксації його на поверхні обслуговування та максимально припустимими значеннями технологічного навантаження.

В остаточному підсумку отримані результати дослідження надають достатні підстави ствердження доцільності використання безпілотних літальних апаратів, навіть з виконанням силових операцій, для технічного обслуговування висотних промислових споруд при одночасному виключенні безпосередньої праці людини та передачі їй лише функцій управління<sup>1</sup>.

4. J. Borenstein, Geoffrey A. Long, Mariпа Del Rey. Apparatus for obstacle traversal. Patent US № 6512345 Int. Cl. B08B9/045. Filed: Mar. 30, 2001; Date of Patent: Jan. 28, 2003.
5. Jan Mlčoch, Jana Marková, Miroslav Sýkora. Maintenance optimization of industrial chimneys exposed to carbonation. Civil Engineering Series, Vol. 17, No. 2, 2017, pp. 73–78.
6. Simon Nilsson, Johan Widmark. Robot for vertical in-pipe climbing. Degree project in Stockholm, Sweden 2019. pp. 11–16.
7. Дрони та димарі або український досвід використання. Інтернет ресурс. URL: <https://drone.ua/ru/blogs/news/dronyi-i-dyimohodyi-ili-ukrainskiy-opuyit-ispolzovaniya-elios-2> (дата звернення: 20.05.2024).
8. Використання дронів-безпілотників для перевірки магістральних каналізаційних труб. Інтернет ресурс. URL: <http://green.obob.tv/ispolzovanie-dronov-bespilotnikov/> (дата звернення: 28.09.2022).
9. Mikio Urabe. Survey equipment and computer programs for inner walls of pipelines. Patent Japan JP7019010 Int. Cl. B64C 39/02. Filed: 2020.10.21. Date of Patent: 2022.2.14.
10. Patent WO2019180479 Int. Cl. B64C 27/08. Surface washing drone. Filed: 19.03.18. Date of Patent: 26.09.19.
11. Ролік О.І., Поліщук М.М. Дрон для технічного обслуговування труб великого діаметру: заявка на видачу патенту України на винахід № а202305577; МПК В64С39/02; реєстр. 21.11.2023. *Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій*. 2024, 14 с.

### **Polishchuk M.M., Rolik O.I. DRONE FOR MAINTENANCE OF LARGE DIAMETER PIPES**

*In modern industry, large-diameter vertical pipelines are used for various industrial and utility purposes, such as thermal power plant chimneys, nuclear reactor shafts, and similar structures. Currently, the periodic maintenance of these objects is performed with the involvement of professional climbers, which poses a threat to human health and life. An alternative solution to this problem may be the use of unmanned aerial vehicles, or rather drones in the form of quadcopters or multicopters. When performing various technological operations, such as diagnostics of the internal surfaces of pipes, their cleaning and application of protective coatings, mechanical processing and other production operations, the problem of harmonizing the aerodynamic thrust developed by the drone, gravitational and permissible technological loads arises. Real research, which includes objects of engineering and scientific novelty, is devoted to the solution of this task. The first include fundamentally new design solutions for the drone and its technological equipment, and the second include analytical and graphic dependencies of the above parameters.*

*The main advantage of the proposed drone is its ability to service large-diameter vertical pipelines, while overcoming the gravitational load even when performing power technological operations. The drone contains a manipulator installed on its platform and a device for periodic fixation on the vertical surface of the pipeline in the form of vacuum grippers. The article proposes a model of a drone based on the equations of quasi-statistical equilibrium, as a result of which analytical dependencies are obtained for calculating the parameters of the drone's functioning. The results of modeling the ratios of gravitational load, aerodynamic thrust and permissible technological loads are presented. The main motivation of the conducted research is to reduce the cost of maintenance of the internal surfaces of vertical pipelines while eliminating human labor and transferring only management functions to him.*

**Key words:** *unmanned aerial vehicles, quadrocopter, pipe monitoring, aerodynamic thrust, information system, drone control, modeling.*