

УДК 629.361.3; 628.4.08

О. В. Березюк¹

МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗНЕВОДНЕННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ У СМІТТЄВОЗІ

¹Вінницький національний технічний університет

Запропоновано математичну модель роботи приводу зневоднення твердих побутових відходів у сміттєвозі, яка дозволила дослідити динаміку вказаного приводу та отримати рівняння регресії для визначення номінального значення кутової швидкості гідромотора. Під час дослідження використано числовий метод Рунге–Кутта–Фельберга четвертого порядку зі змінним кроком інтегрування, а також метод регресійного аналізу результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей з вибором кращого виду функції з 16 найпоширеніших варіантів за критерієм максимального коефіцієнта кореляції. Аналітичне дослідження спрощеної математичної моделі роботи приводу зневоднення твердих побутових відходів у сміттєвозі методом розв'язання системи звичайних лінійних диференціальних рівнянь за допомогою перетворень за Лапласом та методом розкладання виразу на простіші дроби дозволило отримати аналітичні взаємозалежності його основних параметрів, що можуть бути використані для виконання попередніх проектних розрахунків параметрів цього приводу. Під час порівняння результатів, отриманих з використанням повної та спрощеної математичних моделей приводу зневоднення твердих побутових відходів у сміттєвозі, зокрема кутової швидкості гідромотора похибка склала 7,06 %, що є прийнятним для виконання попередніх проектних розрахунків основних параметрів приводу. Запропоновано науково-обґрунтовану методику проектного розрахунку приводу зневоднення твердих побутових відходів у сміттєвозі, яка дозволяє отримати основні його геометричні, силові та швидкісні параметри та є однією зі складових для вирішення проблеми створення науково-технічних основ проектування високоефективних робочих органів машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів. Отримано основні геометричні, силові та швидкісні параметри приводу зневоднення твердих побутових відходів у сміттєвозі.

Ключові слова: сміттєвоз, шнековий прес, зневоднення, тверді побутові відходи.

Вступ

В населених пунктах України щороку утворюються більше 54 млн м³ твердих побутових відходів (ТПВ), основна частина яких захоронюється на 4530 полігонах та сміттєзвалищах площею майже 7700 га та лише частково переробляються або утилізуються на сміттєспалювальних заводах, на відміну від країн ЄС, де широко впроваджені сучасні технології поводження з ТПВ [1]. Протягом 1999—2014 рр. в Україні в 3 рази збільшилась загальна площа полігонів та сміттєзвалищ. Майже в 2 рази зросла площа перевантажених та більше ніж в 3,1 рази тих полігонів і сміттєзвалищ, що порушують норми екологічної безпеки. Збирання та транспортування ТПВ до місць захоронення та сміттєспалювання в Україні здійснюється майже 4000 спеціальними автомобілями (кузовними сміттєвозами), здатними ущільнювати ТПВ, зменшуючи витрати на транспортування та необхідні площі полігонів, але водночас потребуючих значних витрат коштів. Щороку лише на транспортування ТПВ до місця утилізації за межі санітарної зони в 30 км в Україні витрачається більше 45 тис. т пального. Зношеність автопарку сміттєвозів вітчизняних комунальних підприємств досягає майже 70 % [2]. Відповідно до Постанови Кабміну № 265 [3], важливим є забезпечення застосування сучасних високоефективних сміттєвозів у комунальному господарстві України, як основної ланки в структурі машин для збирання та первинної переробки ТПВ. Тому розроблення методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для зневоднення ТПВ у сміттєвозі, є актуальною науково-технічною задачею як однією зі складових для вирішення пробле-

ми створення науково-технічних основ проектування високоефективних робочих органів машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів.

В роботі [4] запропоновано схему приводу зневоднення та ущільнення ТПВ під час їхнього завантаження у сміттєвоз, що реалізується за допомогою використання конічного шнека. В статті [5] наведено: результати експериментального дослідження процесів зневоднення ТПВ шнековим пресом, регресійні моделі показників зневоднення від основних параметрів впливу, параметричну оптимізацію цільової функції — енергоємності зневоднення ТПВ, яка дозволила отримати оптимальні значення параметрів технологічного процесу зневоднення. Однак конкретних методик інженерних розрахунків параметрів обладнання для зневоднення ТПВ у сміттєвозі, за результатами аналізу відомих публікацій, автором не виявлено.

Метою дослідження є розробка методики інженерних розрахунків параметрів обладнання для зневоднення твердих побутових відходів у сміттєвозі.

Математична модель роботи приводу зневоднення ТПВ у сміттєвозі

На рис. 1 показана розрахункова схема приводу зневоднення ТПВ у сміттєвозі.

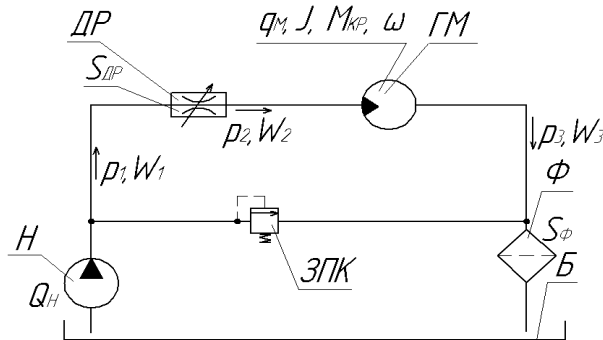


Рис. 1. Розрахункова схема приводу зневоднення ТПВ у сміттєвозі: ГМ — гідромотор, ДР — дросель, Н — гідронасос, ЗПК — запобіжно-переливний клапан, Ф — фільтр, Б — бак з робочою рідиною, p_1, p_2, p_3 — тиски, відповідно, на виході насоса, на вході гідромотора, на виході гідромотора; W_1, W_2, W_3 — об'єми трубопроводів між насосом та дроселем, дроселем та гідромотором, гідромотором та фільтром; Q_H — фактична подача насоса; $S_{ДР}$ — площа прохідного отвору дроселя; S_{Φ} — площа поверхні фільтруючого елемента; q_M — робочий об'єм гідромотора; J — момент інерції на валу гідромотора; $M_{кр}$ — крутний момент технологічного навантаження на валу гідромотора; ω — кутова швидкість вала гідромотора

В процесі розробки математичної моделі роботи приводу зневоднення ТПВ у сміттєвозі прийняті припущення, наведені в роботі [6], а також припущення, що момент сухого тертя в гідромоторі залежить тільки від тисків, які притискають поверхні, що труться.

З урахуванням припущень робота приводу зневоднення ТПВ у сміттєвозі може бути описана:

– системою диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} Q_H = \mu S_{ДР} \sqrt{2(p_1 - p_2)/\rho} + \sigma(p_1 - p_2) + K W_1 \dot{p}_1, & (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mu S_{ДР} \sqrt{2(p_1 - p_2)/\rho} = q_{MX} \omega + \sigma(p_2 - p_3) + K W_2 \dot{p}_2, & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} q_{MX} \omega = k_{\Phi} S_{\Phi} p_3 / \mu_{\Phi} + \sigma p_3 + K W_3 \dot{p}_3, & (3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} q_{MX} (p_2 - p_3) = J \dot{\omega} + \beta \omega + \alpha q_{MX} (p_2 + p_3) + M_{кр}; & (4) \end{cases}$$

– системою алгебраїчних рівнянь

$$J = L_{ш} \rho_0 \bar{T}^2 (\bar{D}^2 - \bar{d}^2) / (16\pi) + \pi \rho_{ш} \left[n_g h (\bar{D} - \bar{d}) (\bar{D}^2 - \bar{d}^2) \sqrt{\pi^2 (\bar{D} - \bar{d})^2 + 4\bar{T}^2} + L_c \bar{d}^4 \right] / 32; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} M_{кр} = 30 \left[12231 + 109,8 w_0 - 0,7676 \rho_0 + 27,45 n + 91602 \Delta_{ш} / D_{\min} - 41610 d_{\min} / D_{\min} - 0,2475 w_0 n + \right. \\ \left. + 558,6 w_0 \Delta_{ш} / D_{\min} - 260,9 w_0 d_{\min} / D_{\min} - 7,713 \rho_0 d_{\min} / D_{\min} - 165174 (\Delta_{ш} / D_{\min}) (d_{\min} / D_{\min}) + \right. \\ \left. + 0,7082 w_0^2 + 0,009383 \rho_0^2 - 0,0726 n^2 + 40815 (d_{\min} / D_{\min})^2 \right] / \pi n; \quad (6) \end{aligned}$$

$$q_{MX} = q_M / 2\pi, \quad (7)$$

де $L_{ш}$ — довжина шнека, м; ρ_0 — початкова густина ТПВ, кг/м³; \bar{T} — усереднений крок витків конічного шнека, м; \bar{D} — усереднений зовнішній діаметр шнека, м; \bar{d} — усереднений діаметр осердя шнека, м; $\rho_{ш}$ — густина матеріалу шнека, кг/м³; n_e — кількість витків шнека; h — товщина витка, м; L_c — довжина осердя шнека, м; w_0 — початкова відносна вологість ТПВ, %; n — номінальна частота обертання шнека, об/хв; $\Delta_{ш}$ — радіальний зазор між шнеком та корпусом, м; D_{min} — зовнішній діаметр шнека на останньому витку, м; d_{min} — діаметр осердя шнека на останньому витку, м; q_{MX} — радіальний робочий об'єм гідромотора, м³.

Вираз (5) отриманий на основі математичних перетворень рівнянь, наведених в роботі [7], а вираз (6) — наведених в роботі [5] результатів експериментальних досліджень.

Зміна основних параметрів приводу зневоднення ТПВ під час пуску показана на рис. 2, де цифрами 1—3 позначено криві, які відповідають таким значенням площі відкриття регульованого дроселя $S_{др}$: 25, 30, 35 мм², відповідно. Графічні залежності, показані на рис. 2, отримані для таких параметрів приводу: $Q_H = 9,167 \cdot 10^{-4}$ м³/с; $q_{MX} = 2,546 \cdot 10^{-5}$ м³/рад; $M_{KP} = 192,4$ Н·м; $J = 7,375 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; $W_1 = 1,48 \cdot 10^{-3}$ м³; $W_2 = 5 \cdot 10^{-4}$ м³; $W_3 = 5 \cdot 10^{-4}$ м³; $K = 10^{-9}$ Па⁻¹; $\sigma = 9,24 \cdot 10^{-11}$ м⁵/(Н·с).

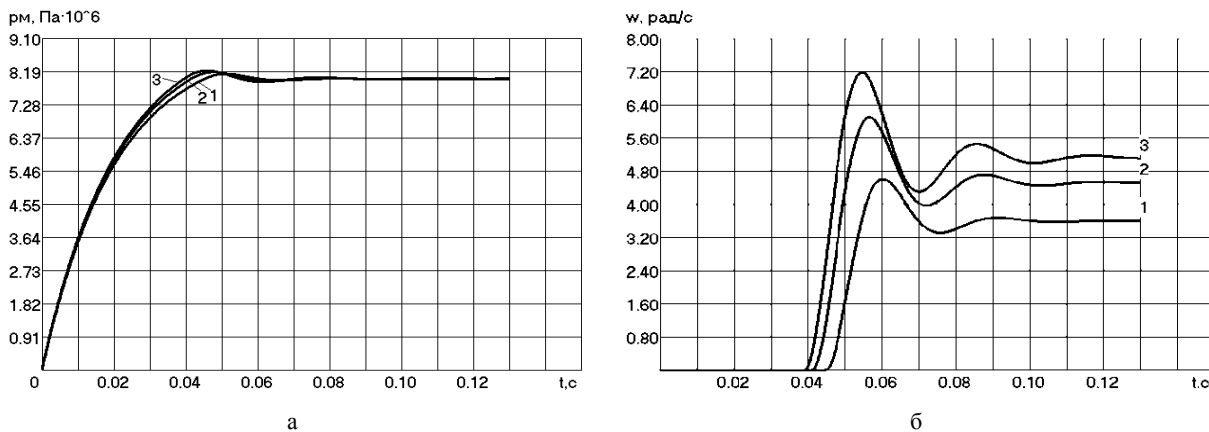


Рис. 2. Зміна параметрів приводу зневоднення ТПВ під час пуску: а — тиску на вході гідромотора; б — кутової швидкості гідромотора

Аналіз результатів математичного моделювання динаміки приводу зневоднення ТПВ показав, що цей привод під час пуску працюватиме стійко з якісними перехідними процесами. Також виявлено, що збільшення площі прохідного отвору регульованого дроселя $S_{др}$ суттєво впливає на підвищення номінального значення кутової швидкості гідромотора, а на підвищення номінального значення тиску на вході гідромотора майже не впливає. Також встановлено, що зі збільшенням площі прохідного отвору регульованого дроселя $S_{др}$ час виходу гідромотора на номінальний режим кутової швидкості суттєво зростає.

Після проведення регресійного аналізу за [8], [9], отримано таке рівняння регресії для номінального значення кутової швидкості гідромотора:

$$\omega_H = 8,717 - 127,2/S_{др} \text{ [рад/с]}. \quad (8)$$

При цьому коефіцієнт кореляції для рівняння регресії (8) склав 0,99907, що свідчить про високу точність отриманого рівняння. Встановлена залежність (8) може бути використана для розробки методики інженерних розрахунків параметрів приводу зневоднення ТПВ.

Аналіз проведених досліджень повної математичної моделі (1)—(4) показав, що $p_1 \approx p_2 \approx p_{12}$, а вплив тиску в зливних магістралях, сил в'язкого тертя при переміщенні рухомих частин гідромотора на роботу гідроприводу є несуттєвим.

Тому, спрощена математична модель приводу зневоднення ТПВ має вигляд

$$\begin{cases} Q_H = q_{MX} \omega + \sigma p_{12} + K W_{12} \dot{p}_{12}, \\ q_{MX} p_{12} = J \dot{\omega} + M_{KP}. \end{cases} \quad (9)$$

$$(10)$$

Порівняння результатів, отриманих з використанням повної та спрощеної математичних моделей приводу зневоднення ТПВ, показано на рис. 3. При цьому похибка, зокрема для кутової

швидкості гідромотора, склала 7,06 %, що є прийнятним для виконання попередніх проектних розрахунків основних параметрів приводу.

Для дослідження спрощеної математичної моделі (8)—(9) використаємо перетворення за Лапласом [10], згідно з яким отримаємо:

$$\begin{cases} Q_H/s = \Omega(s)q_{MX} + P(s)\sigma + P(s)sKW_{12}, \\ P(s)q_{MX} = \Omega(s)J + M_{KP}/s. \end{cases} \quad (11)$$

$$P(s)q_{MX} = \Omega(s)J + M_{KP}/s. \quad (12)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (11)—(12) методом підстановки, отримаємо:

$$P(s) = \frac{Q_H J s + M_{KP}}{s(KW_{12} J s^2 + J \sigma s + q_{MX}^2)}. \quad (13)$$

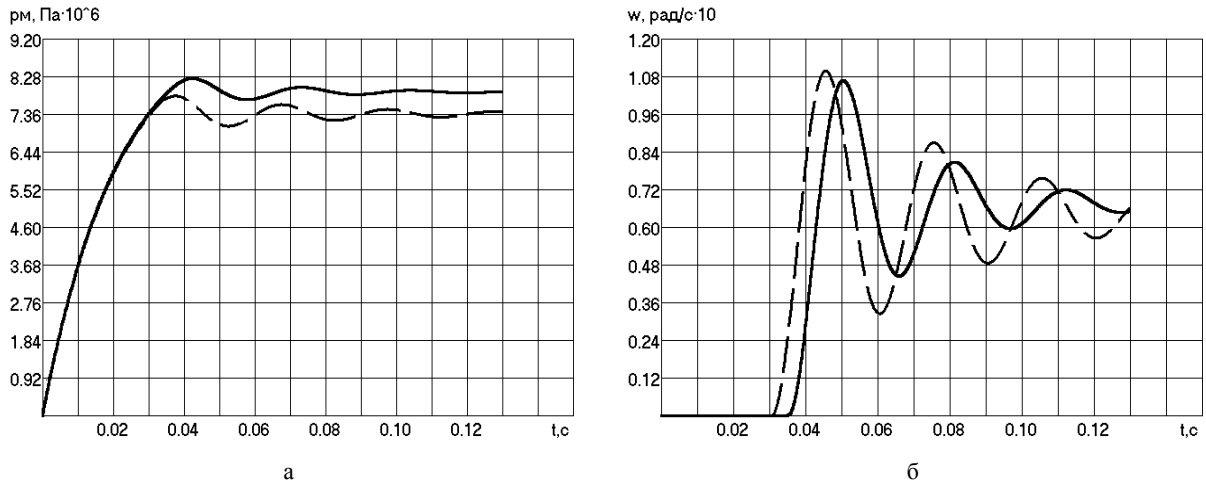


Рис. 3. Порівняння результатів, отриманих з використанням повної (—) та спрощеної (---) математичних моделей приводу зневоднення ТПВ: а — зміна тиску на вході гідромотора; б — зміна кутової швидкості гідромотора

Методом розкладання виразу (13) на простіші дроби, після приведення до канонічного вигляду отримаємо:

$$P(s) = \frac{M_{KP}}{q_{MX}} \frac{1}{s} - \frac{M_{KP}}{q_{MX}} \frac{s + \sigma/(2KW_{12})}{[s + \sigma/2KW_{12}]^2 + q_{MX}^2/KW_{12}J - \sigma^2/4K^2W_{12}^2} + \left(2Q_H - \frac{M_{KP}\sigma}{q_{MX}} \right) \sqrt{\frac{J}{4KW_{12}q_{MX}^2 - J\sigma^2}} \frac{\sqrt{q_{MX}^2/KW_{12}J - \sigma^2/4K^2W_{12}^2}}{[s + \sigma/2KW_{12}]^2 + q_{MX}^2/KW_{12}J - \sigma^2/4K^2W_{12}^2}. \quad (14)$$

Далі знаходимо оригінал зображення (14)

$$p_{12}(t) = \frac{M_{KP}}{q_{MX}} - \frac{M_{KP}}{q_{MX}} e^{-\frac{\sigma}{2KW_{12}}t} \cos\left(\sqrt{\frac{q_{MX}^2}{KW_{12}J} - \frac{\sigma^2}{4K^2W_{12}^2}}t\right) + \left(2Q_H - \frac{M_{KP}\sigma}{q_{MX}} \right) \sqrt{\frac{J}{4KW_{12}q_{MX}^2 - J\sigma^2}} e^{-\frac{\sigma}{2KW_{12}}t} \sin\left(\sqrt{\frac{q_{MX}^2}{KW_{12}J} - \frac{\sigma^2}{4K^2W_{12}^2}}t\right). \quad (15)$$

Нехтуючи незначними коефіцієнтами рівняння (15), які мають вищий порядок малості, та враховуючи початкову умову $p_{12}(0) = 0$, зміну тиску на вході в гідромотор можна описати рівнянням:

$$p_{12}(t) \approx \left[1 - e^{-\sigma t/(2KW_{12})} \cos(q_{MX}t/\sqrt{KW_{12}J}) \right] M_{KP}/q_{MX}. \quad (16)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (11)—(12) відносно $\Omega(s)$, після приведення до канонічного вигляду, отримаємо:

$$\Omega(s) = \left(\frac{Q_H}{q_{MX}} - \frac{M_{KP}\sigma}{q_{MX}^2} \right) \frac{1}{s} - \left(\frac{Q_H}{q_{MX}} - \frac{M_{KP}\sigma}{q_{MX}^2} \right) \frac{s + \sigma/2KW_{12}}{[s + \sigma/2KW_{12}]^2 + q_{MX}^2/KW_{12}J - \sigma^2/4K^2W_{12}^2} -$$

$$- \frac{2KW_{12}M_{KP}q_{MX}^2 + J\sigma(Q_Hq_{MX} - M_{KP}\sigma)}{q_{MX}\sqrt{4KW_{12}Jq_{MX}^2 - J^2\sigma^2}} \frac{\sqrt{q_{MX}^2/KW_{12}J - \sigma^2/4K^2W_{12}^2}}{[s + 2\sigma/(2KW_{12})]^2 + q_{MX}^2/KW_{12}J - \sigma^2/4K^2W_{12}^2}.$$
(17)

Далі знаходимо оригінал зображення (17)

$$\omega(t) = \frac{Q_H}{q_{MX}} - \frac{M_{KP}\sigma}{q_{MX}^2} - \left(\frac{Q_H}{q_{MX}} - \frac{M_{KP}\sigma}{q_{MX}^2} \right) e^{-\frac{\sigma}{2KW_{12}}t} \cos\left(\sqrt{\frac{q_{MX}^2}{KW_{12}J} - \frac{\sigma^2}{4K^2W_{12}^2}} t \right) -$$

$$- \frac{2KW_{12}M_{KP}q_{MX}^2 + J\sigma(Q_Hq_{MX} - M_{KP}\sigma)}{q_{MX}\sqrt{4KW_{12}Jq_{MX}^2 - J^2\sigma^2}} e^{-\frac{\sigma}{2KW_{12}}t} \sin\left(\sqrt{\frac{q_{MX}^2}{KW_{12}J} - \frac{\sigma^2}{4K^2W_{12}^2}} t \right).$$
(18)

Нехтуючи незначними коефіцієнтами рівняння (18), які мають вищий порядок малості, та враховуючи початкову умову $\omega(0) = 0$, зміну кутової швидкості гідромотора можна описати рівнянням:

$$\omega(t) \approx \left(Q_H/q_{MX} - M_{KP}\sigma/q_{MX}^2 \right) \left[1 - e^{-\sigma t/(2KW_{12})} \cos\left(q_{MX}t/\sqrt{KW_{12}J} \right) \right].$$
(19)

Аналізуючи рівняння (16) та (19), знаходимо вирази для визначення номінальних значень тиску на вході в гідромотор та кутової швидкості гідромотора:

$$p_{12H} = M_{KP}/q_{MX};$$
(20)

$$\omega_H = Q_H/q_{MX} - M_{KP}\sigma/q_{MX}^2.$$
(21)

Методика інженерних розрахунків параметрів обладнання для зневоднення ТПВ у сміттєвозі

Визначаємо номінальну потужність приводу

$$P_H = Q_H p_H \text{ [Вт]},$$
(22)

де p_H — номінальний тиск на виході гідронасоса, Па.

Для знаходження оптимальних співвідношень факторів впливу прирівнюємо до нуля частинні похідні енергоємності зневоднення ТПВ шнековим пресом [5] від основних параметрів процесу $\partial C_{зн}/\partial n = \partial C_{зн}/\partial(\Delta_{ш}/D_{\min}) = \partial C_{зн}/\partial(\Delta_{\min}/D_{\min}) = 0$, в результаті чого отримуємо вирази для визначення оптимальних значень основних параметрів процесу зневоднення ТПВ шнековим пресом від властивостей ТПВ: початкових відносної вологості w_0 та густини ρ_0 :

$$n_{\text{опт}} = 64,86 - 0,13w_0 - 0,02664\rho_0 \text{ [об/хв]},$$
(23)

$$\left(\Delta_{ш}/D_{\min} \right)_{\text{опт}} = 9,892 \cdot 10^{-3} - 8,697 \cdot 10^{-5} w_0 + 9,624 \cdot 10^{-6} \rho_0;$$
(24)

$$\left(d_{\min}/D_{\min} \right)_{\text{опт}} = 0,7386 + 8,024 \cdot 10^{-4} w_0 - 1,275 \cdot 10^{-4} \rho_0,$$
(25)

де $n_{\text{опт}}$ — оптимальна частота обертання шнека, об/хв; $\left(\Delta_{ш}/D_{\min} \right)_{\text{опт}}$ — оптимальне відношення радіального зазору між шнеком та корпусом до зовнішнього діаметра шнека на останньому витку; $\left(d_{\min}/D_{\min} \right)_{\text{опт}}$ — оптимальне відношення діаметра осердя шнека до його зовнішнього діаметра на останньому витку.

Орієнтовна густина зневоднених та попередньо ущільнених ТПВ визначається за формулою [5]

$$\rho_1 = 10,91\rho_0 - 94,31 w_0 - 14,43n_{\text{опт}} + 11944\left(\Delta_{ш}/D_{\min}\right)_{\text{опт}} + 15221\left(d_{\min}/D_{\min}\right)_{\text{опт}} + 0,279 w_0 n_{\text{опт}} +$$

$$+ 69,59 w_0 \left(d_{\min}/D_{\min}\right)_{\text{опт}} - 0,02256\rho_0 n_{\text{опт}} - 30,7\rho_0 \left(\Delta_{ш}/D_{\min}\right)_{\text{опт}} - \left(d_{\min}/D_{\min}\right)_{\text{опт}} 15,75\rho_0 +$$

$$+ 0,1863 w_0^2 + 0,003849\rho_0^2 + 0,04267n_{\text{опт}}^2 - 8741\left(d_{\min}/D_{\min}\right)_{\text{опт}}^2 - 4210 \text{ [кг/м}^3\text{]}.$$
(26)

Знаходимо зовнішній діаметр шнека на останньому витку [11]

$$D_{\min} = \sqrt[3]{\frac{240P_H\rho_1\eta \ln p_{\max}}{\left[1 - (d_{\min}/D_{\min})_{\text{опт}}^2\right] \pi^2 n_{\text{опт}} f \cdot \cos^2 \alpha \left[(\rho_1 - \rho_0)(p_{\max} - 1) + \rho_0 p_{\max} \ln p_{\max}\right]}} \quad [\text{м}], \quad (27)$$

де η — КПД привода; p_{\max} — максимальний тиск в зоні ущільнення ТПВ шнеком, Па ($p_{\max} = 106,7$ МПа на основі результатів експерименту [5]); f — коефіцієнт тертя ТПВ по витках шнека ($f = 0,3$); α — кут підйому гвинтової лінії шнека, град.

Визначаємо масштабний коефіцієнт шнека

$$k_M = D_{\min}/0,031. \quad (28)$$

Знаходимо решту геометричних розмірів шнека:

$$\Delta_{\text{ш}} = D_{\min} (\Delta_{\text{ш}}/D_{\min}); \quad d_{\min} = D_{\min} (d_{\min}/D_{\min})_{\text{опт}}; \quad D_{\max} = 0,054k_M; \quad d_{\max} = 0,028k_M \quad [\text{м}]; \quad (29)$$

$$T_{\max} = 0,038k_M; \quad T_{\min} = 0,011k_M; \quad h = 0,004k_M; \quad L_{\text{ш}} = 0,21k_M; \quad L_c = 0,31k_M \quad [\text{м}], \quad (30)$$

де $\Delta_{\text{ш}}$ — радіальний зазор між шнеком та корпусом, м; d_{\min} — діаметра осердя шнека на останньому витку, м; D_{\max} — зовнішній діаметр шнека на першому витку, м; d_{\max} — діаметра осердя шнека на першому витку, м; T_{\max} — крок витків шнека на першому витку, м; T_{\min} — крок витків шнека на останньому витку, м; h — товщина витка, м; $L_{\text{ш}}$ — довжина шнека, м; L_c — довжина осердя шнека, м.

Знаходимо енергоємність процесу зневоднення ТПВ шнековим пресом [5]

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{зн}} = & 1504 - 15,92w_0 + 0,3214\rho_0 - 1,069n_{\text{опт}} - 2061\Delta_{\text{ш}}/D_{\min} - 1947d_{\min}/D_{\min} + \\ & + 9,118 \cdot 10^{-4} w_0\rho_0 + 0,002142w_0n_{\text{опт}} + 18,12w_0 \Delta_{\text{ш}}/D_{\min} - 2,115w_0 d_{\min}/D_{\min} + \\ & + 4,392 \cdot 10^{-4} \rho_0 n_{\text{опт}} - 2,005\rho_0 \Delta_{\text{ш}}/D_{\min} + 0,3361\rho_0 d_{\min}/D_{\min} + 0,09031W_0^2 - \\ & - 7,923 \cdot 10^{-4} \rho_0^2 + 0,008241n_{\text{опт}}^2 + 104172(\Delta_{\text{ш}}/D_{\min})^2 + 1318(d_{\min}/D_{\min})^2 \quad [\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{т}]. \end{aligned} \quad (31)$$

Визначаємо орієнтовну відносну вологість ТПВ після зневоднення [5]

$$\begin{aligned} w_1 = & 772,5 + 5,626w_0 - 1,147\rho_0 - 1,517n_{\text{опт}} + 1935\Delta_{\text{ш}}/D_{\min} - 1950d_{\min}/D_{\min} - \\ & - 0,008773w_0n_{\text{опт}} + 44,12w_0 \Delta_{\text{ш}}/D_{\min} - 10,57w_0 d_{\min}/D_{\min} + 0,001673\rho_0n_{\text{опт}} - \\ & - 4,644\rho_0 \Delta_{\text{ш}}/D_{\min} + 1,32\rho_0 d_{\min}/D_{\min} + 2,219n_{\text{опт}} d_{\min}/D_{\min} - \\ & - 4198(\Delta_{\text{ш}}/D_{\min})(d_{\min}/D_{\min}) + 0,01839w_0^2 + 2,346 \cdot 10^{-4} \rho_0^2 + 1417(d_{\min}/D_{\min})^2 \quad [\%]. \end{aligned} \quad (32)$$

Залишок ТПВ на ситі після подрібнення під час зневоднення визначається за формулою [12]

$$\begin{aligned} P = & 11,64d_{\text{cp}} + 0,3621\rho_0 - 184,9d_{\min}/D_{\min} - 0,03129d_{\text{cp}}\rho_0 + 13,44d_{\text{cp}}d_{\min}/D_{\min} - \\ & - 0,6247d_{\text{cp}}^2 + 32,47(d_{\min}/D_{\min})^2 \quad [\%], \end{aligned} \quad (33)$$

де d_{cp} — середній розмір частинок кожного залишку ТПВ між двома суміжними ситами, мм.

Визначаємо модуль помелу під час зневоднення ТПВ шнековим пресом [13]

$$M = \sum_{i=0}^n d_{\text{cp},i} P_i / 100 \quad [\text{мм}]. \quad (34)$$

Знаходимо енергоємність подрібнення ТПВ під час зневоднення [12]

$$\epsilon_{\text{др}} = 2,654\rho_0 - 462,9d_{\min}/D_{\min} - 452,5(d_{\min}/D_{\min})^2 \quad [\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{т}]. \quad (35)$$

Визначаємо крутний момент на валу гідромотора [11]

$$M_{\text{кр}} = 30P_H\eta/\pi n_{\text{опт}} \quad [\text{Нм}]. \quad (36)$$

На основі виразу (8) визначимо площу прохідного отвору дроселя

$$S_{\text{др}} = 3816/(261,5 - \pi n_{\text{опт}}) \quad [\text{мм}^2]. \quad (37)$$

Розв'язуючи квадратне рівняння (21) відносно q_{MX} і враховуючи вираз (7), визначаємо робочий об'єм гідромотора

$$q_M = \left(30Q_H + \sqrt{900Q_H^2 - 120\pi n_{\text{опт}} M_{KP} \sigma} \right) / n_{\text{опт}} \text{ [м}^3\text{]}, \quad (38)$$

де $\sigma = 9,24 \cdot 10^{-11} \text{ м}^5/(\text{Н}\cdot\text{с})$ — коефіцієнт перетікання робочої рідини.

За ГОСТ 13824-80 [14] вибираємо стандартне значення q_M , округливши розрахункове в більшу сторону.

Визначаємо перепад тиску на гідромоторі за формулою, отриманою на основі виразів (20), (7)

$$\Delta p_M = 2\pi M_{KP} / q_M \text{ [Па]}. \quad (39)$$

Витрати робочої рідини в гідромоторі знаходимо за формулою [15]

$$Q_M = q_M n_{\text{опт}} / 60 \eta_{VM} \text{ [м}^3\text{/с]}, \quad (40)$$

де η_{VM} — об'ємний ККД гідромотора.

Параметри обладнання для зневоднення ТПВ у сміттєвозі, розраховані за запропонованою методикою, зведені в таблицю.

Основні параметри обладнання для зневоднення ТПВ у сміттєвозі

Параметри процесу зневоднення									
P_H , кВт	$n_{\text{опт}}$, об/хв	$(\Delta_{\text{ш}}/D_{\text{min}})_{\text{опт}}$	$(d_{\text{min}}/D_{\text{min}})_{\text{опт}}$	ρ_1 , кг/м ³	D_{min} , мм	k_M	$\Delta_{\text{ш}}$, мм	d_{min} , мм	
19,7	52,75	$8,105 \cdot 10^{-3}$	0,7462	535,6	89	2,863	0,7193	66	
D_{max} , мм	d_{max} , мм	T_{max} , мм	T_{min} , мм	h , мм	$L_{\text{ш}}$, мм	L_c , мм	$\epsilon_{\text{зн}}$, кВт·год/т	w_1 , %	
155	80	109	31	11	601	887	240,8	20,87	
Параметри процесу подрібнення					Параметри приводу обладнання для зневоднення ТПВ				
P_0 , %	P_8 , %	P_{12} , %	M , мм	$\epsilon_{\text{др}}$, кВт·год/т	$M_{\text{кр}}$, Нм	$S_{\text{др}}$, мм ²	q_M , см ³	Δp_M , МПа	Q_M , л/хв
11,29	45,64	43,56	11,11	13,06	1769	39,85	1250	8,894	70,14

Параметри обладнання для зневоднення ТПВ у сміттєвозі отримані за таких вихідних даних: $Q_H = 1,917 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; $p_H = 10 \text{ МПа}$; $w_0 = 46\%$; $\rho_0 = 230 \text{ кг/м}^3$; $\eta = 0,51$; $\alpha = 0,112 \text{ рад}$; $d_{\text{ср},0} = 4 \text{ мм}$; $d_{\text{ср},8} = 10 \text{ мм}$; $d_{\text{ср},12} = 14 \text{ мм}$; $\eta_{VM} = 0,94$.

Використання запропонованої методики інженерного розрахунку параметрів обладнання для зневоднення ТПВ у сміттєвозі дозволяє суттєво скоротити час проектування, уникнути необґрунтованих витрат на трудомісткі експериментальні та теоретичні дослідження.

Висновки

1. Запропоновано математичну модель роботи приводу зневоднення твердих побутових відходів у сміттєвозі, яка дозволила дослідити динаміку вказаного приводу та отримати рівняння регресії для визначення номінального значення кутової швидкості гідромотора.

2. Аналітичне дослідження спрощеної математичної моделі роботи приводу зневоднення твердих побутових відходів у сміттєвозі дозволило отримати аналітичні взаємозалежності його основних параметрів, що можуть бути використані для виконання попередніх проектних розрахунків параметрів цього приводу.

3. Запропоновано науково-обґрунтовану методику проектного розрахунку приводу зневоднення твердих побутових відходів у сміттєвозі, яка дозволяє отримати основні його геометричні, силові та швидкісні параметри.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] О. В. Березюк, «Моделирование распространенности повторного использования твердых бытовых отходов», на *Международ. науч.-практ. конф. Актуальные проблемы архитектуры, строительства, энергоэффективности и экологии*, Тюмень, 2016, т. II, с. 11-16.

[2] В. В. Попович, О. В. Придатко, М. І. Сичевський, Н. П. Попович, і М. А. Панасюк, «Ефективність експлуатації сміттєвозів у середовищі "місто-сміттєзвалище"», *Науковий вісник НЛТУ України*, т. 27, № 10, с. 111-116, 2017.

[3] Кабінет Міністрів України (2004, Берез. 4). *Постанова № 265 «Про затвердження Програми поводження з твердими побутовими відходами.»* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/265-2004-%D0%BF>.

- [4] О. В. Березюк, «Привод зневоднення та ущільнення твердих побутових відходів у сміттєвозі,» *Вісник машинобудування та транспорту*, № 2, с. 14-18, 2016.
- [5] О. В. Березюк, «Експериментальне дослідження процесів зневоднення твердих побутових відходів шнековим пресом,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 18-24, 2018, <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2018-140-5-18-24>.
- [6] В. І. Савуляк, і О. В. Березюк, *Технічне забезпечення збирання, перевезення та підготовки до переробки твердих побутових відходів*, монографія. Вінниця: ВНТУ, 2006, 217 с.
- [7] І. Гевко, А. Дячун, і Р. Грудовий, «Дослідження моменту інерції гвинтових транспортерів,» *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*, № 16, с. 201-210, 2012.
- [8] О. В. Березюк, «Комп'ютерна програма "Регресійний аналіз" ("RegAnaliz")», *Свідомство про реєстрацію авторського права на твір № 49486*, Київ: Державна служба інтелектуальної власності України, дата реєстрації: 03.06.2013.
- [9] О. В. Березюк, «Встановлення регресій параметрів захоронення відходів та потреби в ущільнювальних машинах на основі комп'ютерної програми "RegAnaliz",» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 40-45, 2014.
- [10] А. Г. Свешников, и А. Н. Тихонов, *Теория функций комплексной переменной*, 6-е изд., стереот. Москва, РФ: ФИЗМАТЛИТ, 2005, 336 с.
- [11] М. С. Татарьянц, С. И. Завинский, и А. Г. Трошин, «Разработка методики расчёта нагрузок на шнек и энергозатрат шнековых прессов,» *ScienceRise*, т. 6, № 2 (11), с. 80-84, 2015.
- [12] О. В. Березюк, «Експериментальне дослідження процесу подрібнення твердих побутових відходів під час зневоднення шнековим пресом,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 75-80, 2019. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-146-5-75-80>
- [13] ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы определения крупности размолта и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений.
- [14] ГОСТ 13824-80. Гидроприводы объемные и смазочные системы. Номинальные рабочие объемы.
- [15] В. А. Васильченко, *Гидравлическое оборудование мобильных машин*, справочник. Москва, РФ: Машиностроение, 1983, 301 с.

Рекомендована кафедрою безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 03.03.2020

Березюк Олег Володимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, e-mail: berezyukoleg@i.ua .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. V. Bereziuk¹

Methodic of Engineering Calculations of Equipment Parameters for Solid Domestic Waste Dewatering in a Garbage Truck

¹Vinnitsia National Technical University

A mathematical model of the operation of the solid domestic waste dewatering drive in a garbage truck is proposed. This model allows us to study the dynamics of this process and obtain regression equations for determining the nominal value of the angular velocity of the hydraulic motor. During the study there has been used the numerical method of Runge–Kutta–Vellberg of the fourth order with a variable step of integration, and regression results of one-factor experiments and other pair of dependencies with a selection of the best function of the 16 most common variants on the criterion of the maximum correlation coefficient. An analytical study of a simplified mathematical model of the operation of the solid domestic waste dewatering system in a garbage truck by solving a system of ordinary linear differential equations using Laplace transformations and by decomposing the expression into simple fractions allowed us to obtain analytical interdependencies of its main parameters, which can be used to perform preliminary design calculations of the parameters of this drive. When comparing the results obtained using full and simplified mathematical models for dewatering solid domestic waste in a garbage truck, in particular the angular velocity of the hydraulic motor, the error was 7,06 %, which is acceptable for performing preliminary design calculations of the main drive parameters. A scientifically-based method of design calculation of the drive for dewatering solid domestic waste in a garbage truck is proposed. This method allows to obtain the basic geometric, power and speed parameters and is one of the components for solving the problem of creating scientific and technical bases for designing highly efficient working bodies of machines for cleaning and primary processing of solid domestic waste. The main geometric, power and speed parameters of the drive for dewatering solid domestic waste in a garbage truck are obtained.

Keywords: garbage truck, screw press, dewatering, solid domestic wastes.

Bereziuk Oleh V. — Cand. Sc. (Eng.), Associated Professor, Associated Professor of the Chair of Security of Life and Pedagogic of Security, e-mail: berezyukoleg@i.ua

Методика инженерных расчетов параметров оборудования для обезвоживания твердых бытовых отходов в мусоровозе

¹Вінницький національний технічний університет

Предложена математическая модель работы привода обезвоживания твердых бытовых отходов в мусоровозе, позволяющая исследовать динамику указанного привода и получить уравнение регрессии для определения номинального значения угловой скорости гидромотора. При исследовании использован числовой метод Рунге–Кутты–Фельберга четвертого порядка со сменным шагом интегрирования, а также метод регрессионного анализа результатов однофакторных экспериментов и других парных зависимостей с выбором лучшего вида функции из 16 наиболее распространенных вариантов по критерию максимального коэффициента корреляции. Аналитическое исследование упрощенной математической модели работы привода обезвоживания твердых бытовых отходов в мусоровозе методом решения системы обычных линейных дифференциальных уравнений с помощью преобразований по Лапласу и методом разложения выражения на более простые дроби позволило получить аналитические взаимозависимости его основных параметров, которые могут быть использованы для выполнения предварительных проектных расчетов параметров этого привода. При сравнении результатов, полученных с использованием полной и упрощенной математических моделей привода обезвоживания твердых бытовых отходов в мусоровозе, в частности угловой скорости гидромотора, погрешность составила 7,06 %, что является приемлемым для выполнения предварительных проектных расчетов основных параметров привода. Предложена научно-обоснованная методика проектного расчета привода обезвоживания твердых бытовых отходов в мусоровозе, позволяющая получить основные его геометрические, силовые и скоростные параметры, и является одной из составляющих для решения проблемы создания научно-технических основ проектирования высокоэффективных рабочих органов машин для сбора и первичной переработки твердых бытовых отходов. Получены основные геометрические, силовые и скоростные параметры привода обезвоживания твердых бытовых отходов в мусоровозе.

Ключевые слова: мусоровоз, шнековый пресс, обезвоживание, твердые бытовые отходы.

Березюк Олег Владимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и педагогики безопасности, e-mail: berezyukoleg@i.ua