III. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА

Березюк О. В.

Вінницький національний технічний університет

УДК 629.114.45

ПЛАНУВАННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙНОГО ГІДРОПРИВОДУ УЩІЛЬНЕННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Разработана установка для снятия экспериментальных данных основных параметров вибрационного гидропривода в процессе вибрационного уплотнения твердых бытовых отходов. Получены уравнения регрессии для амплитуды, частоты и мощности вибраций при уплотнении твердых бытовых отходов. Построены поверхности откликов целевых функций и их двухмерные сечения в основных плоскостях действительных значений параметров влияния. Установлена целесообразность использования вибрационного гидропривода для повышения коэффициента уплотнения твердых бытовых отходов в мусоровозах.

Installation is designed for removing experimental given main parameters vibratory hydraulic drive in process of vibratory compaction of hard domestic waste. Equations of regression are received for amplitude, frequencies and powers of vibrations at compaction of hard domestic waste. Surfaces of responses target functions and their twomeasured of section is built in the main planes of real importances of parameters influence. Practicability of use vibratory hydraulic drive is installed for increasing of factor compaction of hard domestic waste in wastecar.

Постановка проблеми. За даними статистики у населених пунктах України щорічно утворюється близько 46 млн. м^3 твердих побутових відходів (ТПВ), основна частка (96,5%) яких захоронюється на 770 полігонах загальною площею майже 3 тис. гектарів і лише частково утилізуються на сміттєспалювальних заводах (2,2%) та переробляються (1,3%) [1]. Збирання ТПВ є основним завданням санітарного очищення населених пунктів і здійснюється більше ніж 7,5 тис. спеціальними автомобілями (сміттєвозами) 56 спеціалізованих автопідприємств та 650 цехами, а тому пов'язане із значними фінансовими витратами. Після вивантаження кожного контейнера з ТПВ в бункер сміттєвоза обов'язково виконується операція статичного їх ущільнення. При вищому коефіцієнті ущільнення краще використовується об'єм кузова та вантажопідйомність автомобіля, зменшуються витрати пального, а також і вартість перевезень. У сміттєвозах вітчизняного виробництва, які ущільнюють ТПВ за допомогою гідропривода в статичний спосіб, відходи вдається ущільнювати в 2,2 рази, що значно менше ніж на кращих світових зразках цієї техніки.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз сучасних розробок в галузі ущільнення ТПВ показав, що поряд із традиційними способами ущільнення ТПВ за допомогою плити пресування, у сміттєвозах, наприклад, ROTOPRESS фірми FAUN KUKA відходи пресуються за допомогою пресового шнека в кузові, який має форму обертового барабана, що приводиться в дію за допомогою гідравлічного приводу, який складається з аксіально-поршневого регульованого насоса і

аксіально-поршневого двигуна [2]. Таке технічне вдосконалення підвищує ефективність, але є досить громіздким і складним. Серед відомих в інших галузях промисловості технічних засобів ущільнення різних матеріалів найбільш ефективними виявились вібропресові установки з гідравлічним приводом, дистанційно керовані за допомогою генераторів імпульсів тиску (ГІТ) різного конструктивного виконання [3, 4]. Подібного устаткування із використанням додаткового гідравлічного вібраційного приводу для інтенсифікації процесу ущільнення ТПВ не виявлено. Тому це питання є актуальним і вимагає всебічного вивчення та дослідження.

Формулювання мети і задач дослідження. Метою дослідження є встановлення можливості підвищення коефіцієнту ущільнення ТПВ за рахунок реалізації вібраційного способу їх пресування, а також виявлення залежності основних показників, що характеризують ефективність роботи гідравлічного вібраційного приводу (амплітуди *A*, частоти *f* та вібраційної потужності *P*) від його основних параметрів.

Виклад основного матеріалу. Для цього спроектовано та виготовлено установку для вібраційного ущільнення ТПВ, яка оснащена відповідною реєструючою та вимірювальною апаратурою. Схема установки наведена на рис. 1.

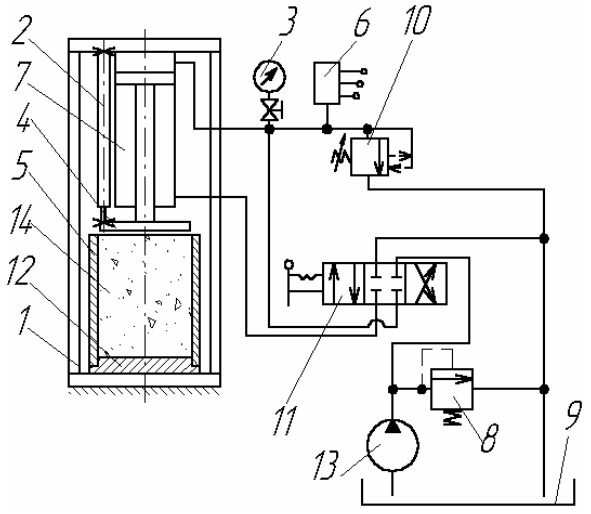


Рис. 1. Схема експериментальної установки для вібраційного ущільнення ТПВ: 1 – рама; 2 – давач переміщень; 3 – манометр; 4 – плита пресування; 5 – бункер для ТПВ; 6 – давач тиску; 7 – гідроциліндр; 8 – запобіжний клапан; 9 – маслобак; 10 – ГІТ [5, 6]; 11 – гідророзподільник; 12 – днище; 13 – гідронасос; 14 – ТПВ

Основними показниками, що характеризують ефективність роботи вібраційного гідроприводу є амплітуда *A*, частота *f* та вібраційна потужність *P*, яку можна визначити за формулою:

$$P = m_p A^2 \omega^3 = 8\pi^3 m_p A^2 f^3, \qquad (1)$$

де m_p – приведена маса рухомих частин; ω – кругова частота.

Основні показники вібраційного гідроприводу є функціями факторів впливу на процес пресування ТПВ:

$$A, f, P = f(Q_H, \rho_B, S_{ДР}, p_{кл1}), \qquad (2)$$

де Q_H – подача гідронасоса, м^3/с; ρ_B – густина ТПВ, кг/м^3; $S_{ДР}$ – площа відкриття дроселя ГІТ, м^2; $p_{кл1}$ – тиску відкриття клапана ГІТ, Па.

Вивчення впливу перерахованих вище факторів на процес пресування ТПВ при проведенні однофакторних експериментів пов'язаний із значними труднощами і об'ємами робіт. Тому, на наш погляд, доцільно проводити багатофакторний експеримент для визначення залежностей (2).

Для забезпечення застосування результатів експериментів для моделювання процесу пресування ТПВ в сміттєвозах різних моделей пропонується перехід від згаданих вище факторів до відносних параметрів:

$$A, f, P = f(v_{\max}, \rho_B, \varphi, p_{B\max}), \qquad (3)$$

де $v_{max}=Q_H/S_{Ц1}$ – максимальна швидкість пресування; $\varphi=S_{ДР}/S_1$ – коефіцієнт, що враховує співвідношення площі відкриття дроселя ГІТ до площі поперечного перерізу вхідного отвору ГІТ; $p_{B\max} = p_{кл1} S_{Ц1} / S_П$ – максимальний тиск пресування; $S_{Ц1}$ – ефективна площа напірної порожнини гідроциліндра; $S_П$ – ефективна площа плити пресування; S_1 – площа поперечного перерізу вхідного отвору ГІТ.

З метою зменшення кількості дослідів, функції (3) визначались за допомогою планування багатофакторного експерименту вигляду 2^4 методом Бокса-Уілсона [7].

Всі фактори, які входять в функції (3), є величинами, що мають різну розмірність, а значення цих величин факторів мають різні порядки. Тому для отримання поверхні відгуку цих функцій виконується операція кодування факторів, що є лінійним перетворенням факторного простору [7]. Встановлено такі значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний –1, середній 0, максимальний +1 та зіркові значення –2, +2. Істинні значення факторів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	-2	-1	0	+1	+2	
x_1 - максимальна швидкість пресування, м/с	0,0764	0,0955	0,1146	0,1337	0,1528	0,0191
x_2 – густина ТПВ, кг/м^3	190	200	210	220	230	10
x_3 - коефіцієнт, що враховує співвідношення площі відкриття дроселя ГІТ до площі поперечного перерізу вхідного отвору ГІТ	0,066	0,082	0,098	0,114	0,13	0,016
x_4 - максимальний тиск пресування, Па	79418	84076	88734	93392	98050	4658

Планувалось отримати такі регресійні моделі 2-го порядку:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + ... + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + \\ + b_{13}x_1x_3 + ... + b_{34}x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + ... + b_{44}x_4^2, \quad (4)$$

де y – одна із функцій A, f, P; b_0, b_1,…, b_4, b_{12},…, b_{34}, b_{11},…, b_{44} – коефіцієнти регресії.

Для визначення точних оцінок b_0, b_1,…, b_4, b_{12},…, b_{34}, b_{11},…, b_{44} використовувався метод найменших квадратів [7]:

$$B=Y\Phi^{-1}, \quad (5)$$

де $B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ ... \\ b_k \end{bmatrix}$ - матриця, що містить коефіцієнти регресії; $\Phi=F^TF$ – інформаційна матриця Фішера; $Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ ... \\ y_N \end{bmatrix}$ - матриця, що містить результати експериментів за матрицею планування; $F = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & ... & x_{1,k} \\ 1 & x_{2,1} & ... & x_{2,k} \\ ... & ... & ... & ... \\ 1 & x_{N,1} & ... & x_{N,k} \end{bmatrix}$ - матриця, що містить значення факторів $x_{i,j}$ (де i - номер досліду за матрицею планування, j – номер фактора); k – кількість факторів; N – кількість дослідів за матрицею планування.

Адекватність регресійних моделей перевірялася за критерієм Фішера [7]:

$$F = S_{ад}^2 / S_{відт}^2 \le [F(f_1, f_2)], \quad (6)$$

де $S_{ад}$ – дисперсія адекватності; $S_{відт}$ – дисперсія відтворюваності; [$F(f1,f2)$] – критичне значення критерію Фішера, яке рівне значенню розподілу Фішера; $f_1=N-d$ – кількість ступенів вільності дисперсії адекватності; $f_2=n-1$ – кількість ступенів вільності дисперсії відтворюваності; d – кількість значимих коефіцієнтів регресії (4); n – кількість попередніх повторних дослідів, які проведено для середнього (нульового) рівня факторів.

Розрахункове значення критерію F порівнювалося з критичним і при F>[$F(f1,f2)$] регресійна модель вважалася неадекватною.

Дисперсія відтворюваності визначалася за формулою [7]:

$$S_{відт}^2 = \frac{1}{f_2}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2, \quad (7)$$

де y_i – результат i-го повторного досліду; $\bar{y}$ – середнє арифметичне значення результатів n повторних дослідів.

Кількість повторних дослідів в кожній точці плану експерименту знаходилась за формулою [8]:

$$n \ge \frac{1+\gamma+2n_{відк}}{1-\gamma}, \quad (8)$$

де γ – довірча ймовірність того, що похибка вимірювання знаходиться в допустимих межах; $n_{відк}$ – число вимірювань, що відкидається.

Згідно рекомендацій авторів робіт [8, 9] довірча ймовірність при нормуванні квантильної оцінки результуючої та випадкової похибок вимірювальної техніки вибирається в межах (0,8…0,9), тоді при $n_{відк}$=0

$$n \geq \frac{1+(0{,}8...0{,}9)}{1-(0{,}8...0{,}9)} = 9...19.$$

Дисперсія адекватності визначалася за формулою [3]:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{f_1}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \tilde{y}_i)^2 , \qquad (9)$$

де y_i – результат *i*-го досліду, проведеною за матрицею планування; $\tilde{y}_i$ – результат *i*-го значення досліду, передбаченого за допомогою регресійної моделі (4).

Значимість коефіцієнтів регресії проводилася за *t*-критерієм Стьюдента [7]:

$$t_i = \frac{b_i}{S_{відт}\sqrt{c_{i,i}}} > [t(f_2)], \qquad (10)$$

де [*t(f2)*] – критичне значення *t*-критерію Стьюдента, яке рівне значенню розподілу Стьюдента; $c_{i,i}$ – відповідний елемент матриці Φ^{-1}.

За результатами осцилограм для кожного досліду згідно матриці планування експерименту проводиться регресійний аналіз, в результаті якого визначено цільові функції *A*, *f, P*.

Для амплітуди *A* рівняння регресії згідно проведеного багатофакторного експерименту для кодованих значень має вигляд

$$\begin{aligned} A = {} & 0{,}2529 + 2{,}92\cdot10^{-4}x_1 + 0{,}03507x_2 + \\ & + 7{,}09\cdot10^{-4}x_3 - 0{,}06026x_4 - 2{,}3\cdot10^{-4}x_1^2 - \\ & - 7{,}3\cdot10^{-4}x_2^2 + 2{,}18\cdot10^{-5}x_3^2 - 0{,}01371x_4^2. \end{aligned} \qquad (11)$$

При цьому $S_{відт}^2 = 6{,}67\cdot10^{-5}$; $S_{ad}^2 = 1{,}37\cdot10^{-4}$; *F*=2,056<[*F*]=2,361, отже регресійна модель (11) адекватна. Квадрат коефіцієнта кореляції R^2=0,9769 свідчить про високу точність отриманих результатів.

Після відкидання незначних факторів рівняння регресії для амплітуди *A* в кодованих значеннях виглядає таким чином:

$$\begin{aligned} A = {} & 0{,}2529 + 0{,}03507x_2 + 7{,}09\cdot10^{-4}x_3 - \\ & - 0{,}06026x_4 - 2{,}3\cdot10^{-4}x_1^2 - 7{,}3\cdot10^{-4}x_2^2 - \\ & - 0{,}01371x_4^2. \end{aligned} \qquad (12)$$

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для амплітуди *A* має вигляд

$$\begin{aligned} A = {} & -3{,}984 + 0{,}003507\rho + 0{,}04431\frac{S_{др}}{S_1} + \\ & + 9{,}92\cdot10^{-5}p_{кл1}\frac{S_{Ц1}}{S_П} - 0{,}6244\frac{Q_H^2}{S_{Ц1}^2} - \\ & - 7{,}27\cdot10^{-6}\rho^2 - 6{,}32\cdot10^{-10}p_{кл1}^2\frac{S_{Ц1}^2}{S_П^2}. \end{aligned} \qquad (13)$$

Для частоти *f* рівняння регресії згідно проведеного багатофакторного експерименту для кодованих значень має вигляд

$$\begin{aligned} f = {} & 44{,}85 + 5{,}466x_1 - 1{,}225x_2 - 1{,}75x_3 - \\ & - 1{,}12x_4 - 0{,}822x_1^2 - 0{,}4626x_2^2 + 0{,}401x_3^2 - \\ & - 0{,}4626x_4^2. \end{aligned} \qquad (14)$$

При цьому $S_{відт}^2 = 0{,}667$; $S_{ad}^2 = 1{,}442$; *F*=2,163<[*F*]=2,361, отже регресійна модель (14) адекватна. Квадрат коефіцієнта кореляції R^2=0,9744 свідчить про високу точність отриманих результатів.

Усі коефіцієнти рівняння регресії (14) виявились значимими.

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для частоти *f* має вигляд

$$\begin{aligned} f = {} & -316{,}17 + 802{,}6\frac{Q_H}{S_{Ц1}} + 1{,}82\rho - 416{,}4\frac{S_{др}}{S_1} + \\ & + 3{,}542\cdot10^{-3}p_{кл1}\frac{S_{Ц1}}{S_П} - 2253\frac{Q_H^2}{S_{Ц1}^2} - 0{,}00463\rho^2 + \\ & + 1567\frac{S_{др}^2}{S_1^2} - 2{,}13\cdot10^{-8}p_{кл1}^2\frac{S_{Ц1}^2}{S_П^2}. \end{aligned} \qquad (15)$$

Для вібраційної потужності *P* рівняння регресії згідно проведеного багатофакторного експерименту для кодованих значень має вигляд

$$\begin{aligned} P = {} & 473{,}2 + 168{,}2x_1 + 85{,}66x_2 - 49{,}91x_3 - \\ & - 226{,}1x_4 + 38{,}79x_1x_2 - 24{,}53x_1x_3 - 87{,}6x_1x_4 - \\ & - 10{,}76x_2x_3 + 22{,}68x_2x_4 + 23{,}56x_3x_4 - \\ & - 8{,}424x_1^2 - 8{,}387x_2^2 + 3{,}781x_3^2 - 4{,}955x_4^2. \end{aligned} \qquad (16)$$

При цьому $S_{відт}^2 = 66{,}7$; $S_{ad}^2 = 155{,}6$; *F*=2,323<[*F*]=2,361, отже регресійна модель (16) адекватна. Квадрат коефіцієнта кореляції R^2=0,9993 свідчить про високу точність отриманих результатів.

Усі коефіцієнти рівняння регресії (16) виявились значимими.

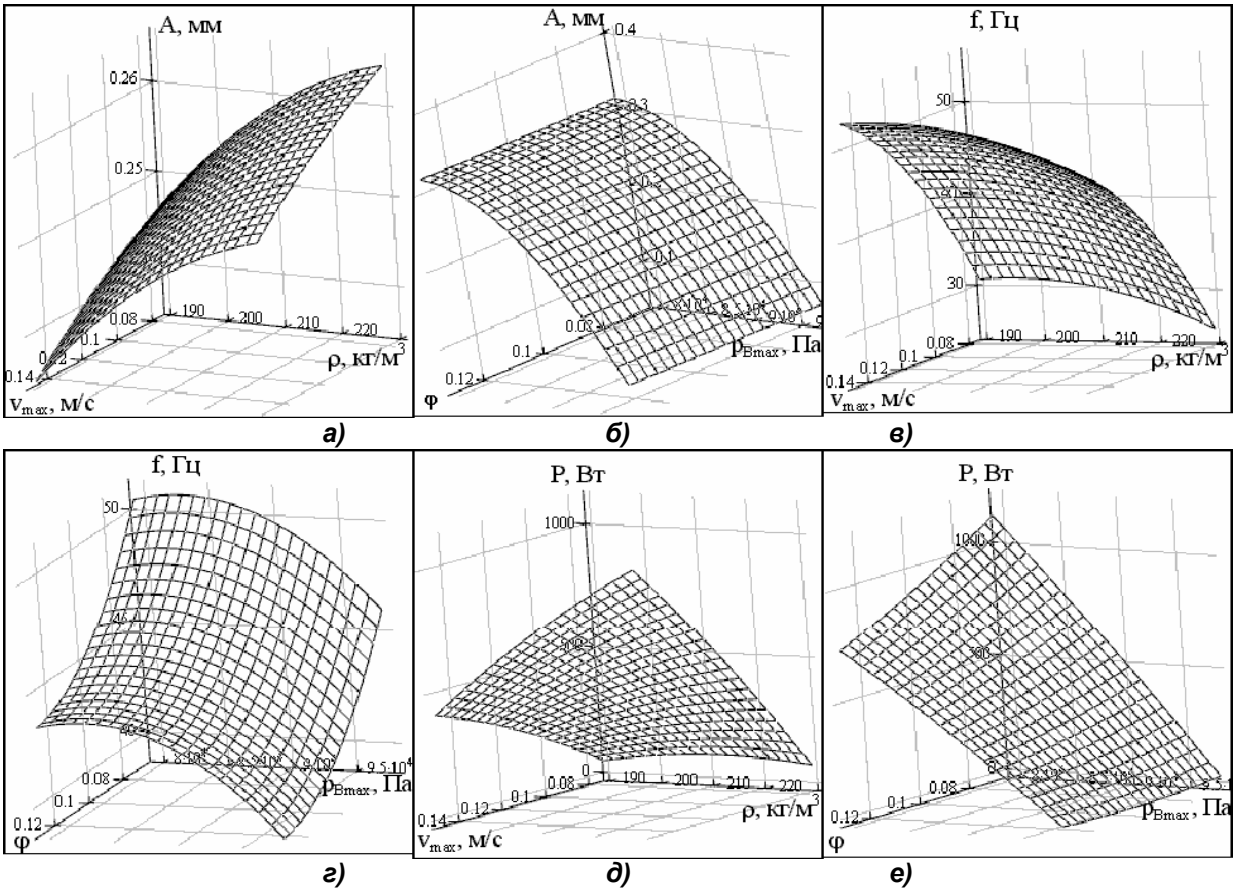
Для дійсних значень факторів рівняння регресії для частоти *f* має вигляд

$$P = 1034{,}8 + 66673\frac{Q_H}{S_{Ц1}} - 16{,}1\rho - 10735\frac{S_{др}}{S_1} -$$
$$- 0{,}0284 p_{кл1}\frac{S_{Ц1}}{S_П} + 203{,}1\frac{Q_H}{S_{Ц1}}\rho - 80278\frac{Q_H}{S_{Ц1}}\frac{S_{др}}{S_1} -$$
$$- 0{,}9845 p_{кл1}\frac{Q_H}{S_П} - 67{,}26\rho\frac{S_{др}}{S_1} +$$
$$+ 4{,}87\cdot 10^{-4}\rho\, p_{кл1}\frac{S_{Ц1}}{S_П} + 0{,}316 p_{кл1}\frac{S_{Ц1}}{S_П}\frac{S_{др}}{S_1} -$$
$$- 23091\frac{Q_H^2}{S_{Ц1}^2} - 0{,}08387\rho^2 +$$
$$+ 14771\frac{S_{др}^2}{S_1^2} - 2{,}28\cdot 10^{-7} p_{кл1}^2\frac{S_{Ц1}^2}{S_П^2}. \qquad (17)$$

Отримані рівняння регресії (13), (15), (17) можуть бути використанні для математичного моделювання вібраційного гідроприводу пресування твердих побутових відходів, а також під час розробки методики інженерних розрахунків його параметрів.

На рис. 2 показано поверхні відгуків цільових функцій A, f, P та їх двомірні перерізи в основних площинах дійсних значень параметрів впливу v_{max}, ρ, φ, p_{Bmax}, які дозволяють наглядно відобразити ці залежності.

Встановлено також максимальне значення коефіцієнта ущільнення твердих побутових відходів за допомогою вібраційного гідроприводу k_y=2,685, що більше приблизно на 20 % від кращих експлуатаційних показників відомих вітчизняних зразків ущільнювального обладнання. Це дозволить суттєво підвищити продуктивність сміттєвозів в цілому (економія пального 2,2 т/рік на один автомобіль) за рахунок кращої наповненості кузова.



а) *б)* *в)*

г) *д)* *е)*

Рис. 2. Поверхні відгуків цільових функцій A, f, P та їх двомірні перерізи в основних площинах дійсних значень параметрів впливу vmax, ρ, φ, pBmax: а) $A = f(\mathrm{v}_{\max}, \rho)$ ***;***
б) $A = f(\varphi, p_{\mathrm{Bmax}})$ ***; в)*** $f = f(\mathrm{v}_{\max}, \rho)$ ***; г)*** $f = f(\varphi, p_{\mathrm{Bmax}})$ ***; д)*** $P = f(\mathrm{v}_{\max}, \rho)$ ***; е)*** $P = f(\varphi, p_{\mathrm{Bmax}})$

Висновки

Розроблено установку, яка оснащена відповідною реєструючою та вимірювальною апаратурою і дозволяє записувати експериментальні дані основних параметрів вібраційного гідроприводу в процесі вібраційного ущільнення твердих побутових відходів. За допомогою проведення багатофакторного експерименту отримано рівняння регресії для амплітуди, частоти та потужності вібрацій при ущільненні твердих побутових відходів, які можуть бути використанні для математичного моделювання вібраційного гідроприводу пресування твердих побутових відходів, а також під час розробки методики інженерних розрахунків його параметрів. Побудовано поверхні відгуків цільових функцій та їх двомірні перерізи в основних площинах дійсних значень параметрів впливу, які дозволяють наглядно відобразити ці залежності. Встановлено, що використання вібраційного гідроприводу дозволяє підвищити коефіцієнт ущільнення твердих побутових відходів у сміттєвозах до 2,685, що більше приблизно на 20 % від кращих експлуатаційних показників відомих вітчизняних зразків ущільнювального обладнання і дозволить суттєво підвищити продуктивність сміттєвозів в цілому (економія пального 2,2 т/рік на один автомобіль) за рахунок кращої наповненості кузова.

Література

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 4 березня 2004 року № 265 "Про затвердження Програми поводження з твердими побутовими відходами".

2. Pressmullfahrzeuge Faun Kuka Rotopress. - Osterholz-Scharmbeck, 1995. - С. 2-3.

3. Коц И.В. Разработка и исследование клапанов-пульсаторов для гидравлических приводов вибрационных и ударно-вибрационных узлов горных машин. - Дис… канд. техн. наук: 05.02.03. - Винница, 1994. - 227 с.

4. Савуляк В.І., Березюк О.В. Технічне забезпечення збирання, перевезення та підготовки до переробки твердих побутових відходів. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 218 с.

5. Патент України № 5076 U, МПК7 F 15 B 21/12. Клапан-пульсатор диференціальної дії / О.В. Березюк - 20040705249; Заявл. 01.07.2004. Опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2. – С.41.

6. Патент України № 29363 U, МПК(2006) F 15 B 21/00. Генератор імпульсів тиску диференціальної дії / О.В. Березюк - 200710323; Заявл. 17.09.2007. Одерж. 10.01.2008.

7. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Наука, 1976. - 280 с.

8. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). Учеб. пособие для вузов. - Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1983. - 320 с.

9. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. - Л.: Энергоатомиздат, 1985. - 114 с.