

УДК 621.9.048

Струтинський В.Б., д.т.н. *, Симонюк В.П., к.т.н. **

*Національний технічний університет України „КПІ”

**Луцький національний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПОВІЛЬНОГО ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ВИХРОВОГО РУХУ СИПУЧОЇ СУМІШІ ПРИ УДАРНО-ІМПУЛЬСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ

На основі проведеного стану питання стосовно віброабразивної обробки деталей, особливо невеликого розміру, а саме, деталей приладів, проведено моделювання процесів, які відбуваються у вібробункері із робочою сумішшю. За основу було взято модель віброабразивної установки із чотирма електромагнітами. Електромагніти мають можливість вмикатись в будь-якій послідовності, але в даному випадку було змодельовано процес із одночасним включенням всіх чотирьох електромагнітів. При цьому було враховано дуже суттєву конструктивну особливість вібробункера, а саме те, що він виготовлений у формі циліндричної ємності із тонкостінного матеріалу, який, під дією певних навантажень, має можливість деформуватись.

Ударно-імпульсна обробка, вібробункер, робоче середовище, гідроудар, циркуляційний рух.

Підвищення ефективності обладнання та процесу ударно-імпульсної обробки деталей у вібробункері потребує широкого кола теоретичних та експериментальних досліджень. Вони полягають у розробці загальної схеми обробки, встановленні основних параметрів вібробункера та робочого середовища, які визначають показники якості процесу обробки.

Робоче середовище являє собою квазіоднорідну рідкотекучу субстанцію з нелінійними характеристиками. При ударно-імпульсному навантаженні вібробункера робоче середовище змінює свої властивості. Для побудови теоретичної моделі повільного циркуляційного руху робочого середовища розглянемо основні його параметри стану. Закономірності руху розглянемо для різних випадків ударного навантаження. Ударні навантаження можуть здійснюватись по симетричній схемі, коли включені всі чотири електромагніти та по асиметричним схемам.

При одночасному включенні всіх чотирьох електромагнітів вібробункер буде рухатись в напрямку вісі z . В першому наближенні будемо вважати рух вібробункера синусоїдальним, відповідним синусоїдальній силі, що створюється електромагнітами. Ударне імпульсне навантаження на вібробункер відбувається при його взаємодії з упорами в точці 1 (рис. 1, в).

Частота включення електромагнітів складає 50 Гц. Амплітуда переміщення 2..3 мм. При ході вібробункера вниз він взаємодіє з упорами і зупиняється. При цьому, в робочому середовищі виникають інтенсивні процеси імпульсного характеру (рис. 2).

При ударі точки D_1 , D_2 дна вібробункера взаємодіють з упорами і зупиняються. Робоче середовище і дно вібробункера рухаються по інерції. При цьому має місце пружна деформація дна вібробункера і він прогинається. Його точка D_3 рухається вниз під дією сил інерції дна та інерції середовища і зупиняється в стані динамічної рівноваги. При цьому гранули і деталі, які утворюють робоче середовище, зупиняються безпосередньо біля поверхні дна вібробункера. Еквівалентний тиск робочого середовища біля дна вібробункера підвищується на величину p_{y0} . Елементи робочого середовища, розташовані вище дна, рухаються за інерцією (по стрілці V_1), натискають на нерухомі елементи, розташовані біля дна, і гальмуються, підвищуючи тиск в області дна і розширюючи цю область. Утворюється ударна хвиля $F_1F_3F_2$. Фронт ударної хвилі рухається вгору із швидкістю ударної хвилі V_a . Фронт ударної хвилі $F_1F_3F_2$ не є плоским. Він викривлений по різним причинам. По-перше, за рахунок прогину дна вібробункера. По-друге, він викривлений за рахунок того, що робоче середовище в центральній частині ущільнюється (стискається) більше ніж біля бокових стінок. Частина робочого середовища біля стінок гальмується і утримується від стиску нерухомими стінками, тому ущільнення біля стінок менше ніж в центральній частині вібробункера. Третьою причиною є деформації стінок вібробункера в радіальному напрямку (точки D_4D_5). Розширення вібробункера знижує еквівалентний тиск на периферії по відношенню до тиску в центрі. Це приводить до

виникнення мікропереміщень елементів робочого середовища від центру до периферії. Переміщення показані стрілками V_2 і V_3 . Фронт ударної хвилі $F_1F_2F_3$ переміщується вгору по висоті вібробункера до тих пір, поки не досягне вільної поверхні робочого середовища. Вільна поверхня внаслідок проходження фронту дещо викривляється і набуває форми кривої $F_4F_5F_6$ (викривлення показано у збільшеному вигляді).

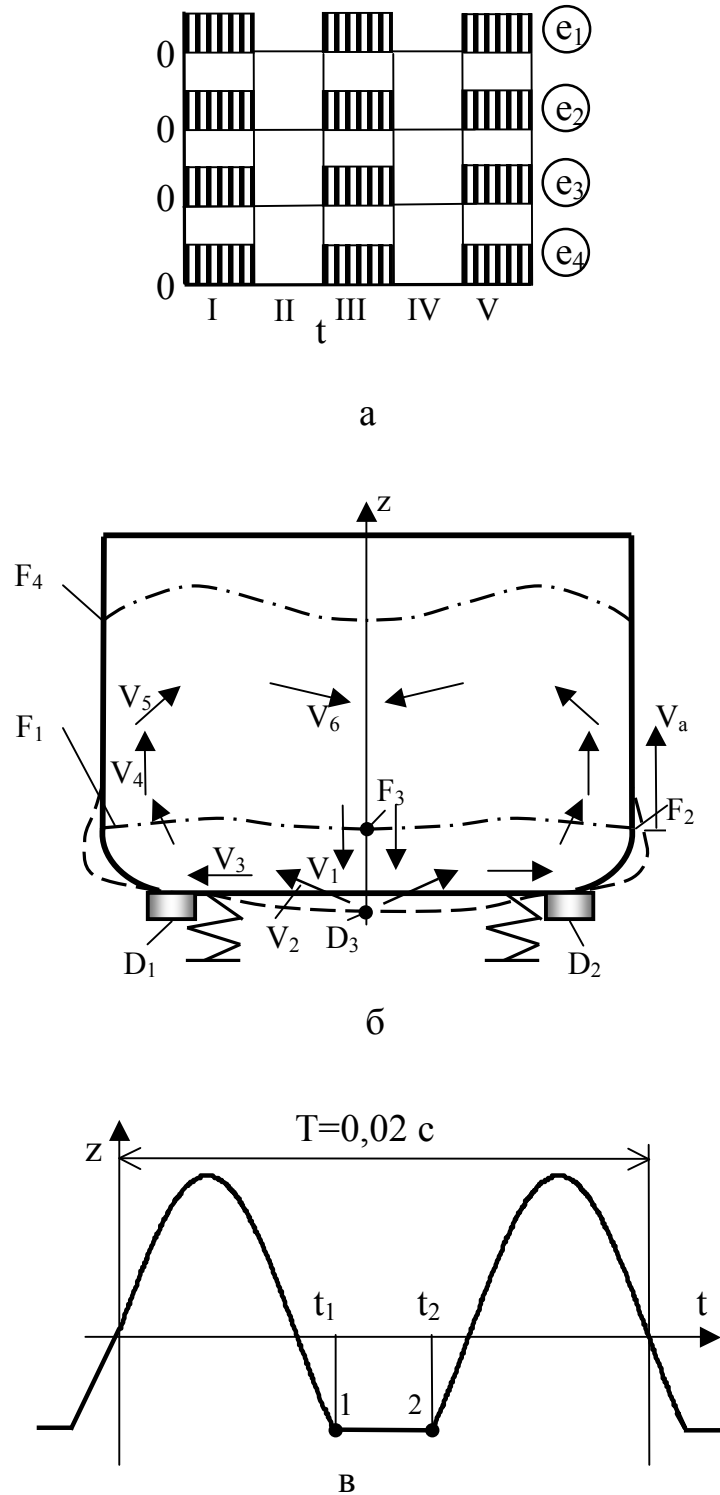


Рис. 1. Циклограма одночасного включення всіх чотирьох електромагнітів (а), схема руху вібробункера (б) та закон переміщення корпусу вібробункера (в) при його симетричному ударно-імпульсному навантаженні

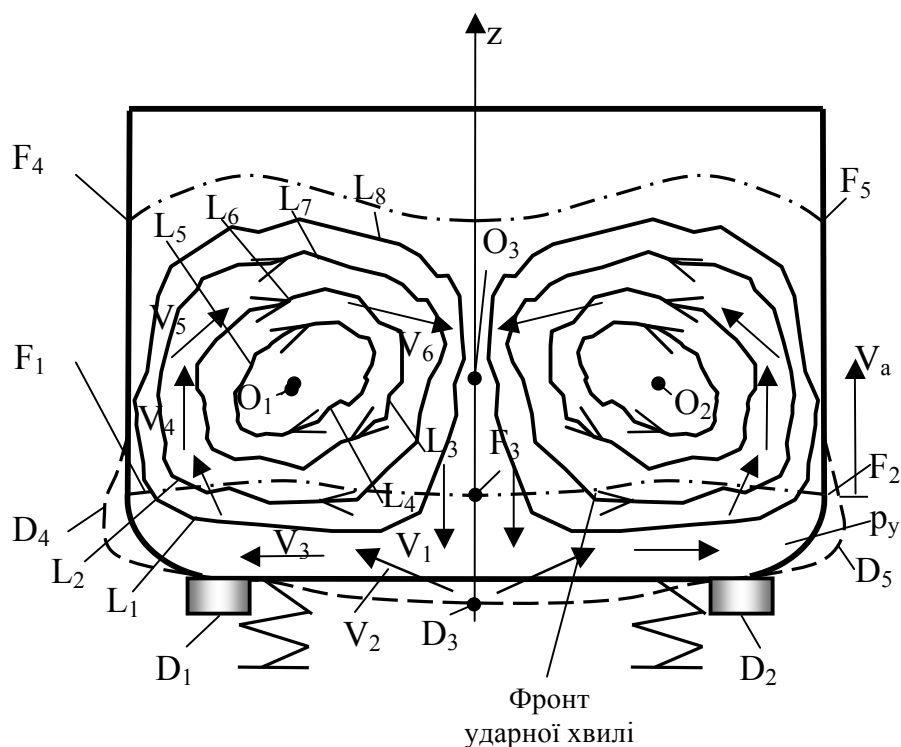


Рис. 2. Схема вісесиметричного вертикального переміщення вібробункера та циркуляційний рух робочого середовища

Переміщення елементів робочого середовища спричиняє циркуляційний рух, який формується у радіальних площинах. Еквівалентні лінії течії (траєкторії руху елементів) є замкнутими і являють собою кільцеві лінії, що мають нижні гілки L_1, L_2, L_3, L_4 та верхні гілки L_5, L_6, L_7, L_8 . Циркуляційний рух є повільним. Він охоплює весь об'єм робочого середовища. Циркуляційний рух має вигляд вихрового кільця з центром в точках O_1 та O_2 .

Таким чином, при ударно-імпульсному навантаженні вібробункера в робочому середовищі виникає вихровий циркуляційний рух, який охоплює тороподібну область. В центрі тороподібної області (точки O_1 та O_2) має місце фокус течії, де її поступальна швидкість близька до нуля.

Для розрахунку динамічних параметрів середовища при ударно-імпульсному навантаженні застосовуються основні положення теорії гідравлічного удару.

Час розповсюдження фронту ударної хвилі від дна вібробункера до вільної поверхні є фазою гідравлічного удару τ :

$$\tau = \frac{H}{v_a}, \quad (1)$$

де H – висота робочого середовища; v_a – швидкість ударної хвилі.

Підвищення тиску визначається із рівняння балансу енергії. При гідравлічному ударі кінетична енергія робочого середовища E_k переходить у потенціальну енергію стиску середовища E_{np} та потенціальну енергію деформованого дна стінок вібробункера E_{nm} . Таким чином, рівняння енергетичного балансу:

$$E_k = E_{nm} + E_{np} + E_\delta \quad (2)$$

де E_δ – енергія, яка втрачається на опір середовища та на нелінійні деформаційні процеси в робочому середовищі.

Кінетична енергія середовища, що рухається із середньою швидкістю v_0 у вібробункері висотою H і радіусом r_0 , визначається формулою:

$$E_k = 0,5\pi r_0^2 H v_0^2, \quad (3)$$

де ρ – середня еквівалентна густина робочого середовища, яке включає деталі і гранули абразиву.

Потенціальна енергія стисненого робочого середовища дорівнює роботі стиснення при дії ударної зміни тиску Δp_y , і визначена як:

$$E_{np} = 0,5\rho\pi r^2 \Delta p_y \Delta H = 0,5\Delta p_y \Delta W, \quad (4)$$

де ΔH – зміна висоти робочого середовища;

ΔW – зміна об'єму робочого середовища.

Прийемо в першому наближенні, що зміна об'єму робочого середовища лінійно залежить від зміни тиску:

$$\Delta W = \frac{W\Delta p_y}{E_a}, \quad (5)$$

де W – об'єм робочого середовища;

E_a – середнє значення еквівалентного модуля пружності робочого середовища.

Визначаючи об'єм середовища як $W = \rho\pi r^2 H$, дістанемо вираз для потенціальної енергії стиснення робочого середовища:

$$E_{np} = \frac{0,5\rho\pi r_0^2 H (\Delta p_y)^2}{E_a}. \quad (6)$$

Потенціальна енергія деформації стінок вібробункера:

$$E_{nm} = 0,5\Delta p_y \rho\pi r_0 H \Delta r,$$

де Δr – деформація стінки вібробункера в радіальному напрямі.

Згідно закону Гука:

$$\Delta r = \frac{\sigma r}{E},$$

де σ – нормальна напруга в матеріалі вібробункера; E – модуль пружності матеріалу стінок вібробункера.

Визначимо напругу як

$$\sigma = \frac{\Delta p_y r}{\delta},$$

де δ – товщина стінки вібробункера.

Потенціальна енергія деформації:

$$E_{nm} = \frac{\pi r^3 H}{\delta E} (\Delta p_y)^2 + E_{dn}.$$

$$E_{dn} = \frac{\pi r^3}{\delta E} K_d (\Delta p_y)^2$$

де E_{dn} – потенціальна енергія дна вібробункера, K_d – коефіцієнт.

Підставимо значення енергій у рівняння енергетичного балансу і дістанемо:

$$0,5\pi r^2 H \rho V_0^2 = \frac{\pi r^2 (H + K_d)}{\delta E} (\Delta p_y)^2 + \frac{\pi r^2 H}{2E_a} (\Delta p_y)^2. \quad (7)$$

Значення ударного тиску:

$$\Delta p_y = \rho V_0 V_a, \quad (8)$$

де, $V_a = \sqrt{\frac{E_{\Pi}}{\rho}}$ – швидкість розповсюдження ударної хвилі;

E_n - приведений модуль пружності вібробункера.

Швидкість розповсюдження гідроударної хвилі є невеликою і становить 50...100 м/с.

Підвищення тиску розраховується за наведеною формулою.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що в реальних умовах розрахункові значення гідроударного підвищення тиску дещо менші (на 10...20 %) за експериментальні (рис. 3).

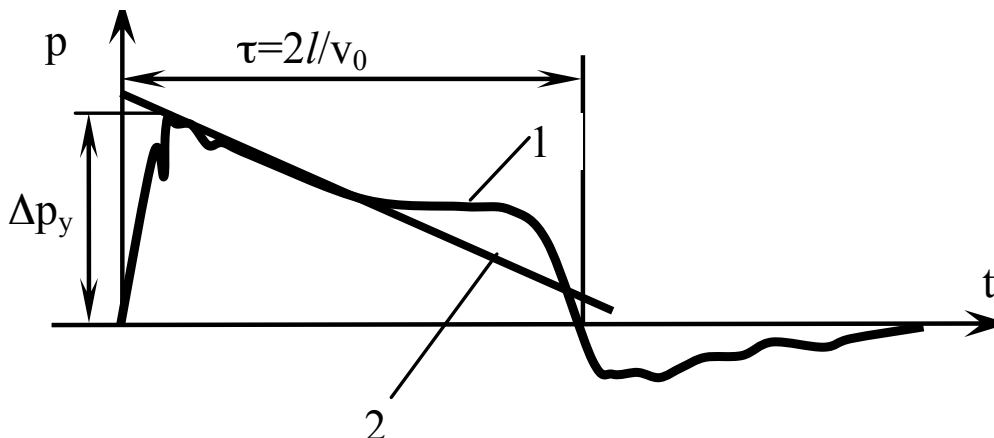


Рис. 3. Схематичний графік зміни гідроударного тиску у вібробункері при гідроударі

Сили опору в робочому середовищі є надзвичайно інтенсивними. Тому гідроударне підвищення тиску швидко зменшується. Запропоновано як перше наближення, що підвищення тиску в околиці дна вібробункера змінюється по трикутному закону (крива 2 на рис. 3).

Підвищення тиску спричинює циркуляційний рух робочого середовища. Напрямок цього руху встановлено раніше. Він направлений від середини дна вібробункера на його периферію (рис. 4).

Робоче середовище розповсюджується повільним циркуляційним потоком, для частини потоку відповідної лінії $O_1O_3O_2$ переміщення середовища відбувається під дією еквівалентного тиску. Прийнято, що еквівалентний тиск гідроудару становить $\frac{1}{2} p_y$. Даний тиск діє в проміжку часу $\Delta t_B = t_2 - t_1$ між точками 1 і 2 (див. рис. 1). При цьому, гідроудар діє в точці 1 і затухає в точці 2. Відповідно, еквівалентний тиск в околиці дна вібробункера складе

$$p_{O1} = \frac{1}{2} p_y \cdot \frac{\Delta t_B}{T} \quad (9)$$

Під дією еквівалентного тиску на лінії $O_1O_3O_2$ має місце течія робочого середовища. Середня швидкість течії V_c буде визначатись перепадом тиску. В першому наближенні приймемо, що для лінії $O_1O_3O_2$ має місце рівняння Бернуллі. Прийнято, що швидкість на вході (в точці O_1) та виході (в точці O_3) однакова. Тоді рівняння Бернуллі набуде вигляду

$$p_{O1} = \frac{\rho}{2} V_c^2 \cdot \xi \quad (10)$$

де ξ – коефіцієнт гідравлічних втрат.

Із даного рівняння визначено середню швидкість циркуляційного руху

$$V_c = \sqrt{\frac{2}{\rho \xi} p_{O1}} = \sqrt{\frac{1}{\xi} \frac{\Delta t_B}{T} V_a V_0}.$$

Таким чином, середня швидкість визначається швидкістю удару V_0 та швидкістю ударної хвилі V_a . Підставивши значення величини, отримаємо

$$V_c = \sqrt{\frac{1}{\xi} \frac{\Delta t_B}{T} \sqrt{\frac{E_{II}}{\rho}} V_0}. \quad (11)$$

Одержану залежність спростимо розкладом в ряд Тейлора і одержимо

$$V_c = a_1 \frac{\Delta t_b}{T} + a_2 E_{II} - a_3 \rho + a_4 V_0, \quad (12)$$

де a_1 - a_4 – постійні, які будуть уточнені по результатам експериментів.

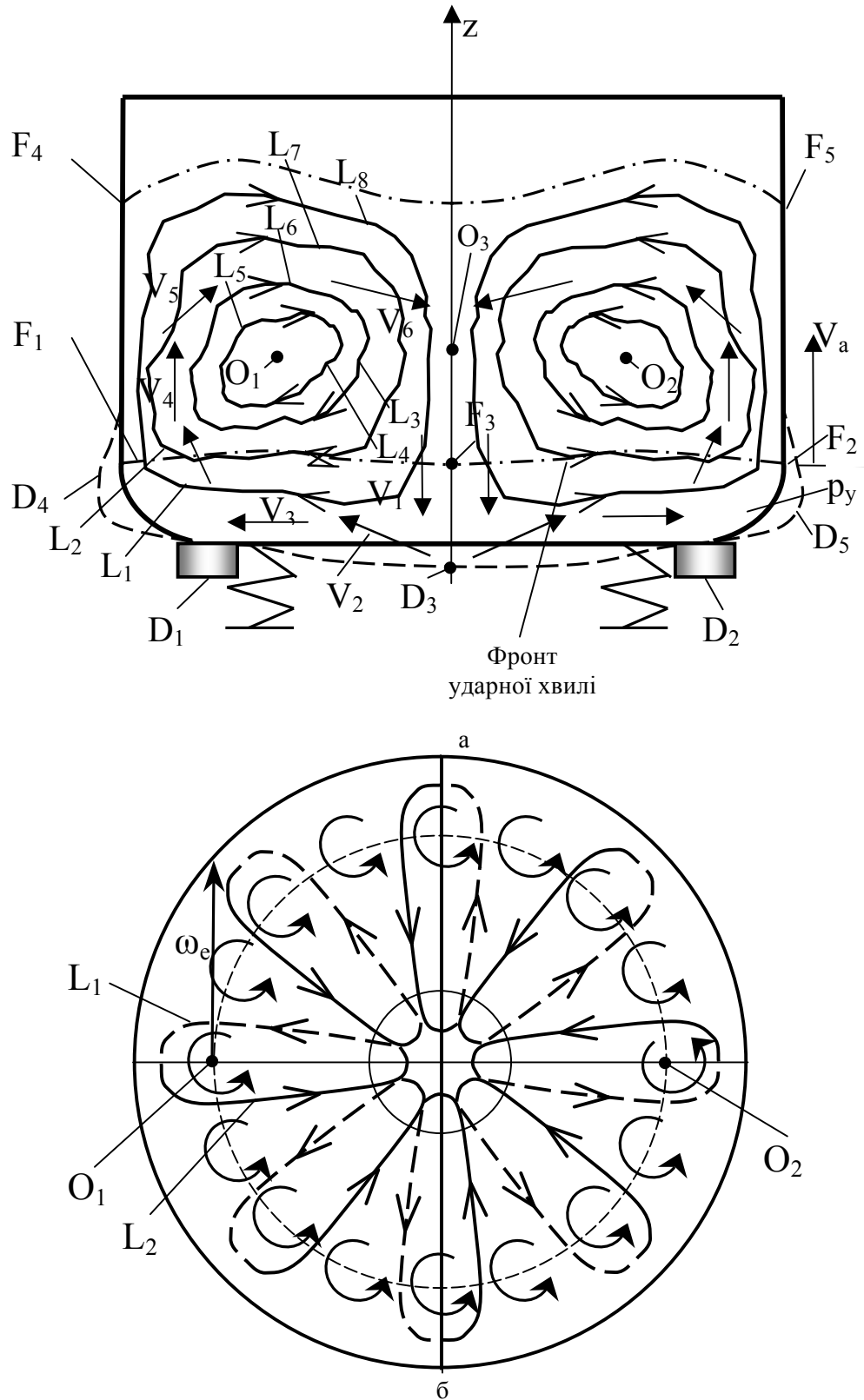


Рис. 4. Циркуляційний рух робочого середовища при симетричному ударно-імпульсному навантаженні: а – вигляд збоку; б - вигляд згори

Вихровий циркуляційний рух приводить до повільного обертання маси робочого середовища. Профіль середніх швидкостей в радіальному перетині середовища описується параболічною залежністю. На осі вібробункера швидкість руху робочого середовища змінюється від нульового значення на поверхні та в центральній частині дна вібробункера до деякого максимального в центральній частині робочого середовища (точка O_3). Таким чином виникає тороподібний вихровий циркуляційний рух робочого середовища (рис. 4, б).

Інтенсивність циркуляційного руху оцінюється еквівалентною кутовою швидкістю ω_e , що характеризує повільне обертання робочого середовища.

Для оцінки кутової швидкості циркуляційного руху використано залежність:

$$\omega_e = \frac{V_c}{r_c}. \quad (13)$$

Вихрові рухи охоплюють весь об'єм робочого середовища.

Висновок. Інтенсивність вихрового циркуляційного руху при симетричному ударному навантаженні є невеликою. Це пояснюється стабілізуючим впливом окремих вихорів, які є симетричними.

1. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки. – Житомир: ЖІТІ, 2001. -611 с.
2. Симонюк В.П. Вдосконалення обладнання та процесу ударно-імпульсної обробки деталей у вібробункері: Дис...канд. техн. наук: – К., 2012. – 192 с.
3. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики: в 2-х томах. Т 2. Динамика. – М.: Наука, 1983. – 640с.
4. Струтинський В.Б., Симонюк В.П., Симонюк О.В. Деклараційний патент на корисну модель «Система віброзбудження вібраційної установки» №2004042434, Україна, В24В31/06, В06В1/18, №3919; заявлено 01.04.2004, опубл. 15.12.2004, бюл. №12.