

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІННИХ ПАРАМЕТРІВ НА ТРАЄКТОРІЮ РУХУ ВІБРОРАМИ БУРОВОГО ВІБРОСИТА

М.М. Лях, Н.В. Федоляк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727101,  
e-mail: no@nimg.edu.ua

У зв'язку з необхідністю підвищення якісних показників роботи бурових вібросит розглянуто результати попередніх досліджень впливу змінних параметрів (подавання промивального розчину, потужності привода та ін.) на траєкторію руху віброрами бурового вібросита, проаналізовано роботи, в яких започатковано вирішення проблеми, вибрано методи дослідження та описано процес проведення дослідження впливу змінних параметрів роботи вібросита на траєкторію руху окремих точок віброрами. Під час роботи використовувались фігури Ліссажу та елементи теорії хаосу.

Встановлено, що основними змінними параметрами в часі, які раніше не враховувались, є маса промивальної рідини, шлама і глини, які містяться на ситополотні та значною мірою залежать від їх густини, в'язкості і вмісту твердих частинок. Загальна маса промивальної рідини, шлама і глини під час руху ситополотном постійно змінюється. Ця величина не є прогнозованою в часі, і її важко описати законами фізики, оскільки вона підпорядковується законам хаосу. Зокрема, траєкторію руху точки віброрами слід подати як квазіатрактор типу соленоїда Смейла–Вільямса.

Результат вказаних досліджень є основою для проведення експериментальних досліджень та вирішення проблемних питань, пов'язаних з впливом змінних параметрів на траєкторію руху віброрами.

Ключові слова: вібросита, режим роботи вібросит, очищення промивальних рідин, ефективність роботи вібросит, траєкторія руху віброрами.

В связи с необходимостью повышения качественных показателей работы буровых вибросит приведены результаты предыдущих исследований влияния переменных параметров (подачи промывочного раствора, мощности привода и др.) на траекторию движения виброрами бурового вибросита, проанализированы работы, в которых предложено решение проблемы, выбраны методы исследования и описан процесс проведения исследования влияния переменных параметров работы вибросита на траекторию движения отдельных точек виброрами. В работе использовались фигуры Лиссажа и элементы теории хаоса.

Установлено, что основными временными переменными параметрами, не учитываемыми ранее, является масса промывной жидкости, шлама и глины, находящиеся на ситополотне и в значительной степени зависящие от их плотности, вязкости и содержания твердых частиц. Общая масса промывочной жидкости, шлама и глины при движении по ситополотну постоянно меняется. Эта величина не прогнозируема во времени, и ее трудно описать законами физики, так как она подчиняется законам хаоса. В частности, траектория движения точки виброрами может быть представлена как квазиатрактор типа соленоида Смейла-Вильямса.

Результат выполненных исследований в данной статье может быть положен в основу проведения экспериментальных исследований и решения проблемных вопросов, связанных с воздействием переменных параметров на траекторию движения виброрами.

Ключевые слова: вибросита, режим работы вибросит, очистка промывочных жидкостей, эффективность работы вибросит, траектория движения виброрами.

This research deals with results of the previous studies concerning the influence of variables (supply of washing solution, the drive power etc.) on the trajectory of the drilling vibrating sieve, as soon as there is a need in increasing the qualitative operation parameters of drilling sieves. The analysis of previous works is conducted, in which the solution to the problem is introduced. The methods of research are selected. The process of conducting the research of influence of variables on trajectory of the drilling vibrating sieve is described. During research Lissajous figures and the elements of chaos theory have been applied.

It has been defined that the main temporary variables include the mass of the washing liquid, cuttings and shale that are situated on the sieve cloth and largely depend on their density, viscosity and solids content. The total mass of the washing liquid, cuttings and shale, moving the sieve cloth, is steadily changing. This magnitude is not predicted in the course of time and is not subjected to the laws of physics, as it is subjected to the chaos laws.

The results of the conducted research can serve as a basis for solving the burning issues concerning the influence of variables on the trajectory of the vibrating frame.

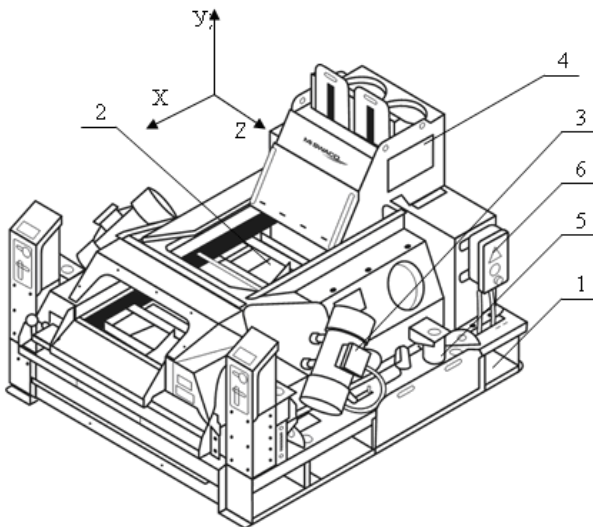
Keywords: Vibrating sieve, Vibrating screen mode, drilling fluids cleaning, the sieves efficiency, the vibrating frame trajectory.

**Вступ.** Для підтримання якості очищення промивальної рідини в процесі спорудження свердловин використовують комплект устаткування для її очищення (вібросита, гідроциклонне обладнання, центрифуги тощо). При бурінні

свердловин з використанням обважнених промивальних розчинів очищення від шлама відбувається переважно на віброситах, оскільки втрата обважнювачів в обладнанні тонкого очищення досить значна. Отож, вібросита є важли-

вою ланкою циркуляційної системи загалом та блоку очищення зокрема, від ефективності роботи яких залежить якість очищення промивальної рідини. Ефективність роботи вібросита залежить від правильності вибору його технологічних параметрів: режимів роботи, амплітуди та віброприскорення, створюваних вібриситом, характеру руху віброрами, продуктивності вібросита, розміру чарунок ситополотна, способу його кріплення на віброрами, жорсткості віброопор віброрами та ін. Вплив пульсації подачі промивальної рідини, і, відповідно, зміни її кількості, яка в певний момент часу знаходиться на ситополотні, незначні зміни потужності привода вібросита, забивання чарунок твердими частинками (шламом) та інших змінних параметрів на процес очищення промивальної рідини на віброситі не є достатньо досліджені, тому виявлення таких залежностей є важливою проблемою для підвищення ефективності його роботи.

**Аналіз сучасних закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення проблеми.** Для дослідження роботи вібросита скористаємось розрахунковою схемою та міркуваннями, наведеними в [1]. Напрямо осей системи координат для наочного відображення та складання рівнянь траєкторій руху віброрами бурового вібросита зображено на рис. 1.



1 – основа, 2 – сито, 3 – вібродвигун,  
4 – завантажувальний бункер,  
5 – амортизатор, 6 – пульт керування

**Рисунок 1 – Вібросито зі збалансовано-еліптичним рухом віброрами та з осями координат**

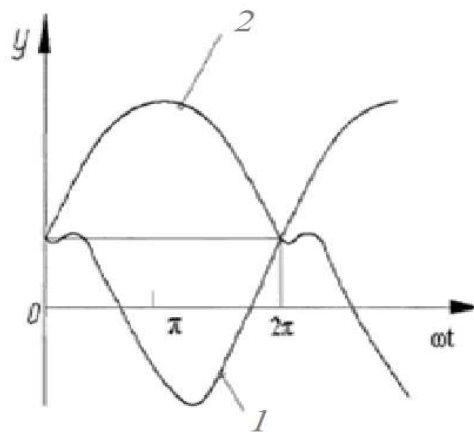
При роботі вібросита в процесі очищення промивальної рідини від шламу вимушуюче (рушійне) коливальне зусилля від вібродвигуна передається на рухому частину очищувального пристрою – віброграму з ситополотном масою  $m_p$ . Віброрама при цьому здійснює коливальний рух з періодом  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , де  $\omega$  – кутова

швидкість дебалансного вала. За цей період відбувається контакт частинок рідини та шламу з ситополотном, та, відповідно, їх підкидання на деяку висоту  $y$ .

Особливістю вібраційного очищення промивальної рідини є те, що за один період коливань віброрами може відбутись лише одне підкидання частинки на визначену висоту, причому висота підкидання залежатиме від її маси та від величини амплітуди в точці контакту з віброрамою, яка коливається. Зміна амплітуди коливань в залежності від довжини віброполотна характерна лише для вібросит з незбалансованим еліптичним рухом, тому таку задачу слід розглядати окремо.

Після контактування з віброрамою частинка промивальної рідини набуває деякої початкової швидкості  $v_2$ , спрямованої вгору (по дотичній до траєкторії руху ситополотна). Частинка підіймається на висоту  $y$  та знову падає на ситополотно. При ударі частинки до ситополотна їй передається відповідний момент інерції  $m_c \cdot v_1$ , тобто чим більша маса частинки  $m_c$ , тим більший момент інерції їй надається, і, відповідно, на вищу висоту  $y$  вона підкидається.

Графік коливань для одиничної частинки з постійною масою  $m_c$  у системі координат  $y - \omega \cdot t$  матиме вигляд параболи 1 (рис. 2) [2]. Коливання віброрами 2 при цьому матимуть характер гармонічних з висотою підйому, яка рівна половині значення амплітуди коливань. При цьому в момент контактування ситополотна з частинками промивальної рідини, що очищується, вивільняється енергія, яка спричиняє його деформацію, і залежить від маси частинок, які контактують з ним. Цей процес видно зі форми вершин графіка 1 (рис. 2) – в момент контактування з параболою 1 мають увігнуту форму.



**Рисунок 2 – Траєкторія руху ситополотна (1) та частинки вибуреної породи, що рухається нею (2)**

На віброситах ВС-2 ситополотна монтують так, щоб в центрі вони мали опуклу форму (рис. 3). Відомо, що найбільша частина промивального розчину на віброситі очищується саме в його центрі (біля 60% від загального об'єму), тому спостерігається вигин вниз ситополотна саме в цій ділянці. Така монтажна особливість

призначена для компенсації прогину від дії ваги промивального розчину та для перерозподілу маси на ситополотні вібростита ВС-2, і, відповідно, кращого його очищення та збільшення довговічності полотна, яке зношуватиметься активніше саме в місці інтенсивнішого контактування з промивальною рідиною (рис. 3).



Рисунок 3 – Ситополотно опуклої форми

Рівняння руху частинки масою  $m_{\text{ч}}$ , яка рухається за параболічним законом, як функція від часу  $t$  матиме вигляд [2]:

$$y = y_0 + v_2 t - \frac{gt^2}{2}, \quad (1)$$

де  $v_2$  – швидкість руху частинки після удару до поверхні ситополотна;

$y_0$  – вертикальна складова переміщення частинки масою  $m_{\text{ч}}$  в початковий момент часу.

Загалом на систему, що коливається, діє квазіпружне зусилля, яке визначається за законом Гука та дорівнює

$$F_{\text{к}} = -c \cdot y_p, \quad (2)$$

де  $c$  – жорсткість пружних опор віброрами;

$y_p$  – вертикальна складова переміщення центру мас віброрами, що відраховується від положення статичної рівноваги.

Також коливна система чинитиме опір рухові із зусиллям

$$F_o = -b \cdot v, \quad (3)$$

де  $b$  – коефіцієнт опору переміщенню;

$v$  – середня швидкість руху віброрами.

За законом Ньютона

$$F_{\text{к}} + F_o + F_3 = m_p a, \quad (4)$$

де  $m_p$  – маса віброрами;

$a$  – прискорення системи,

$F_3$  – зусилля, що викликає переміщення частинки шламу масою  $m_{\text{ч}}$  ситополотном вібростита. Це зусилля рівне різниці величин рушійного зусилля, створюваного вібробудником, та ваги віброрами.

Величина амплітудного зусилля становить

$$P = D \cdot \omega^2, \quad (5)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість вала вібробудника;

$D$  – дебаланс вібробудника.

Рушійне зусилля, що діятиме на віброрами, змінюється за періодичним законом, циклічна частота зміни якого становить  $(\omega \cdot t + \psi)$ , де

$\psi$  – фаза співудару (зсув фаз між змушуючим та квазіпружним зусиллям). Отже, величина рушійного зусилля визначатиметься рівнянням:

$$P_p = P \cos(\omega \cdot t + \psi) = D \cdot \omega^2 \cos(\omega \cdot t + \psi), \quad (6)$$

та, відповідно, вага віброрами рівна  $m_p \cdot g$ , то коливальний рух ситополотна з віброрами може бути описаний диференціальним рівнянням другого порядку [2]:

$$m_p \cdot \ddot{y}_p + b \cdot \dot{y}_p + c \cdot y_p = D \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi) - m_p \cdot g, \quad (7)$$

де  $\ddot{y}_p$  – друга похідна вертикальної складової переміщення центру мас віброрами, що відраховується від положення статичної рівноваги (вертикальна складова вектора прискорення  $a$ );

$\dot{y}_p$  – перша похідна вертикальної складової переміщення центру мас віброрами (вертикальна складова вектора швидкості  $v$ ).

Постановка задачі та вибір методів дослідження. Отож, рух вібростита можна поділити на такі періоди:

1. Пуск вібростита, для якого характерні ріст значення амплітуди коливань віброрами від нуля (зі стану спокою) до величини, яка наближається до амплітудної. Режим роботи вібростита – дорезонансний.

2. Прохід віброститом резонансних частот, коли кутова частота коливань віброрами  $\omega$  наближається до власної частоти коливань  $\omega_0$ ; при цьому амплітуда досягає максимального значення. Режим роботи вібростита – резонансний.

3. Усталений режим – робочий, за якого здійснюється процес очищення промивальної рідини. В цей період роботи спостерігається незначне коливання величини амплітуди, причому траєкторія руху точки віброрами завжди прямуватиме до описування кола (при коловій траєкторії руху віброрами), еліпса (при еліптичній) чи лінії (при лінійному русі). Режим роботи вібростита – зарезонансний.

4. Зупинка вібростита – припиняється подавання промивального розчину; коливання віброрами затухають; амплітуда прямує до нуля.

Для кожного з цих періодів роботи вібростита існує особлива траєкторія руху віброрами, причому вона дещо відрізняється від тієї, яка описана в теорії руху віброститів в класичних теоріях, оскільки в них не враховуються експлуатаційні фактори, які впливають з рівнянь (1) та (7).

При включенні вібростита до виходу на усталений режим роботи кутова частота коливань віброрами  $\omega$  наближається до власної частоти коливань  $\omega_0$ , амплітуда коливань при цьому зростає. При проходженні віброститом резонансу амплітуда коливань значно більша за амплітуду при роботі на усталеному режимі. При проходженні вібростита через резонанс кутова частота коливань віброрами  $\omega$  рівна власній частоті коливань  $\omega_0$  ( $\omega = \omega_0$ ) і спостеріга-



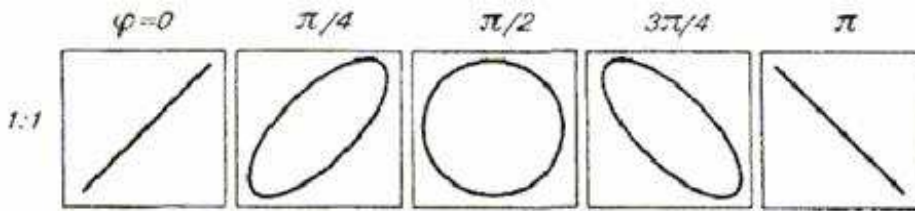


Рисунок 4 – Траєкторії руху віброрами (фігури Ліссажу) при відношенні частот коливань 1:1 (власної та вимушеної) та різних зсувів фаз між ними

ється максимальна амплітуда коливань  $A_{max}$ . При подальшому зростанні  $\omega$  амплітуда зменшується, наближаючись до робочого значення величини амплітуди  $A$ . Вібросито при цьому працюватиме вже в робочому (зарезонансному) режимі, спостерігатимемо усталений рух всіх точок віброрами.

Види траєкторій руху віброрами існуючих вібросит відповідають фігурам Ліссажу з співвідношеннями між періодами частот коливань (власної та вимушеної)  $\omega_0 : \omega = 1:1$  [4] (рис. 4) та описуються відповідними диференціальними рівняннями. Проте траєкторії руху, зображені на рис. 4, мають місце лише в ідеальному випадку при усталеному русі коливань віброграми, в реальних же умовах вони є іншими.

Траєкторія руху віброрами має вигляд кола чи еліпса (при коловому або еліптичному русі віброрами), що виходить з їх нижньої точки, через деякий час при вході в резонанс ми спостерігатимемо коло діаметром  $A_{max}$  (при зсуві фаз  $\psi = \pi/2$ ) або еліпс з більшим і меншим діаметрами, що більші за ті, що матимемо при усталеному режимі (при зсуві фаз  $\psi = \pi/4$  та  $\psi = 3\pi/4$ ). При зсуві фаз  $\psi = 0$  чи  $\psi = \pi$  рух віброрами буде лінійним, а траєкторія руху віброрами – лінія – матиме більшу довжину, ніж при усталеному русі.

Відомо, що для зарезонансних режимів роботи вібромашини сили демпферування відіграють незначну роль. Проте в деяких типах вібросит шляхом зміни жорсткості демпферуючих пружин (віброопор) змінюють режими руху віброрами (випадок незбалансованого вібросит, коли амплітуда коливань на початку ситополотна та в кінці відрізняються: на початку амплітуда коливань вища для того, щоб забезпечити ефективніше очищення, а в кінці руху – нижча, тоді час проходження шламу менший і це забезпечує його краще осушення).

Подавання промивального розчину на ситополотно не здійснюється до виходу вібросит на усталений рух. При проході резонансних частот додаткове навантаження (вага промивального розчину та, відповідно, його коливальний рух з власною частотою) негативно впливатиме на міцність вузлів і деталей вібромашини, тому подавання промивального розчину рекомендовано починати після виходу обладнання на усталений (робочий) режим. Подавання промивального розчину не є сталою величиною – в різні періоди часу роботи вона змінюється. Щоб усталити подавання використову-

ють різні технічні засоби – регульовальні жалюзі, заслінки, розподільники потоку та ін., проте значення подачі завжди коливається в певних межах і залежності здебільшого від режиму роботи бурових насосів.

Через коливання подачі кількість промивального розчину, яка знаходиться на просіюючій поверхні в певний проміжок часу і, відповідно, його маса також змінюватиметься. Маса промивального розчину при потраплянні на ситополотно зменшуватиме амплітуду коливань. Для випадку одиничної частинки це досить добре видно на рисунку 2.

Отже, вплив експлуатаційних та технологічних факторів спричиняє відхилення траєкторії руху віброрами від описаних в [4].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Рівняння (1) та рівняння (7) описують відповідно графіки 2 та 1 (рис. 2). Проте в рівнянні (7) не враховується деформація, яка виникає від контактування частинки масою  $m_c$  з ситополотном. Тобто траєкторія руху віброрами також залежатиме від ваги частинки, яка в певний момент часу перебуває на ситополотні.

При очищенні промивальної рідини таких частинок на ситополотні знаходиться значна кількість – це частинки шламу, який відділяється, та, власне, промивальна рідина, яка рухається по поверхні. Частинки шламу рухаються з підкиданням, а сама промивальна рідина рухається без відривання від ситополотна (рис. 5).



1- з підкиданням; 2 – без підкидання

Рисунок 5 – Рух промивальної рідини ситополотном

Це складний рух, який складається з руху трьох фаз – твердих частинок більшої маси (шламу), рідини та піску (глини). Переміщення твердих частинок, що рухаються з підкиданням, описується рівнянням (1). Частинки піску та глини рухаються в потоці рідини та мають малу масу, що перешкоджає їх підкиданню, тому що вони захоплюються потоком в'язкої рідини. З підкиданням можуть також рухатись великі частинки глини чи піску, що коагулювали.

Оскільки промивальна рідина разом з частинками піску та глини перебувають в постійному контакті з віброрамою, тож вони, як і вага віброрами, впливатимуть на траєкторію руху. Тому в рівнянні, що описує траєкторію руху віброрами, потрібно також врахувати вагу промивального розчину та твердих частинок (шламу), що знаходяться в певний момент часу на ситополотні. Вони чинитимуть опір рушійній силі, яка приводить в рух систему, тому в рівнянні (7) набудуть від'ємного значення:

$$\left( m_p + \sum_{i=1}^n m_{ci} + m_n \right) \cdot \ddot{y}_p + b \cdot \dot{y}_p + c \cdot y_p = \quad (8)$$

$$= D \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi) - \cos(\alpha) \cdot g \cdot (m_p + \sum_{i=1}^n m_{ci} + m_n),$$

де  $\alpha$  – кут нахилу ситополотна до горизонталі,

$m_n$  – маса рідкої фази разом з піском та

глиною, що рухаються без підкидування;

$m_{ci}$  – маса твердої частинки (шламу), що рухається з підкидуванням;

$n$  – кількість частинок, що знаходяться на ситополотні в певний момент часу.

Аналогічно для осі  $x$  рівняння, що описує траєкторію руху віброрами, матиме вигляд:

$$\left( m_p + \sum_{i=1}^n m_{ci} + m_n \right) \cdot \ddot{x}_p + b \cdot \dot{x}_p + c \cdot x_p = \quad (9)$$

$$= D \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi) + \sin(\alpha) \cdot g \cdot (m_p + \sum_{i=1}^n m_{ci} + m_n),$$

де  $\ddot{x}_p$  – друга похідна горизонтальної складової переміщення центру мас віброрами, що відраховується від положення статичної рівноваги (горизонтальна складова вектора прискорення  $a$ );

$\dot{x}_p$  – перша похідна горизонтальної складової переміщення центру мас віброрами (горизонтальна складова вектора швидкості  $v$ );

$x_p$  – вертикальна складова переміщення центру мас віброрами, що відраховується від положення статичної рівноваги.

З аналізу рівнянь (1) та (8) можна виділити основні фактори, які впливатимуть на траєкторію руху точки віброрами та частинок шламу, що переміщуються ситополотном, і, відповідно, на ефективність очищення промивального розчину.

Траєкторія руху частинок згідно (1) залежить від початкової швидкості – швидкості, з якою частинка рухається при виході її з отвору

приймальної ємності – розподільника промивального розчину, швидкості  $v_2$ , якої вона набуває при контактуванні з ситополотном, прискорення її руху та маси частинки. Також значення має період (час  $t$ ) контактування частинки з ситополотном – від нього залежатиме вертикальна складова  $y_0$  переміщення частинки в початковий момент часу в період її контактування з ситополотном.

Траєкторія руху віброрами залежатиме, в першу чергу, від маси віброрами  $m_p$ . Чим більша маса віброрами, тим більше рушійне зусилля повинен мати вібродвигун для створення віброприскорення та віброшвидкості, необхідних для ефективного очищення промивальної рідини. На траєкторію руху віброрами також впливатиме і коефіцієнт опору рухові системи, причому вплив цієї величини викликати згасання вимушених коливань та залежатиме від маси віброрами. Ця залежність виражається через коефіцієнт згасання:

$$\beta = \frac{b}{2m_p}. \quad (10)$$

Тобто чим більша маса віброрами, тим швидше вона викликати згасання коливань, що створюються рушійною силою, яка і викликає коливання віброрами з ситополотном.

Траєкторія руху віброрами залежатиме також від ваги промивальної рідини, що знаходиться на ситополотні, та ваги частинок шламу, що переміщуються ситополотном у потоці промивальної рідини. Чим менший шар промивальної рідини, тим менша вага діє на віброрами. Вага промивальної рідини також залежатиме від її густини.

З рівняння (8) видно, що зміна траєкторії руху ситополотна залежить також від жорсткості пружини віброопор.

Відомо, що траєкторії руху точок віброрами описуються кривими Ліссажу (рис. 4) [4], які є незмінними при усталеній роботі вібропита, а їх зміна, відповідно, сигналізує про несправність вібропита та зміну режиму його роботи.

Зміна жорсткості віброопор призводить до зміни амплітуди вертикальних і горизонтальних коливань, що відображається зміною розмірів півосей еліпсів траєкторії руху. Зростання довжини великої півосі відбувається при зниженні жорсткості відповідної пружини. Кути нахилу великої півосі до горизонту залишаються незмінними [1].

Порушення горизонтальності встановлення вібропита на площині блоку очищення призводить до нерівномірного розподілу навантаження на ситополотно, та, відповідно, на віброопори при роботі та є причиною їх руйнування як результат незбалансованості віброрами [1].

Основний матеріал дослідження. Траєкторія руху кожної з точок віброрами є замкнутою геометричною фігурою, яка складається з множини траєкторій, що лежать в площині  $xy$  (рис. 1), утворених за один оберт дебалансного вала. При сталій подачі (кількості промивальної рідини, що потрапляє на ситополотно)

ці траєкторії наближаються за своєю формою до вигляду фігур Ліссажу, проте подача завжди коливається, що викликає незначні відхилення траєкторії від базової. Також спостерігаються незначні переміщення в площині  $z$  (рис. 1), тому сукупність траєкторій в процесі руху набуває вигляду просторової фігури – тороїда.

Множина нестійких траєкторій руху точки віброрами в фазовому просторі динамічної системи, якою, по суті, є віброрито, має вигляд дивного атрактора (англ. attract – притягувати). Прикладами атракторів є стійкий стан рівноваги та граничний цикл – режим періодичних автоколивань (замкнута фазова траєкторія, до якої наближаються всі сусідні траєкторії, як показано на рис. 6) [5].

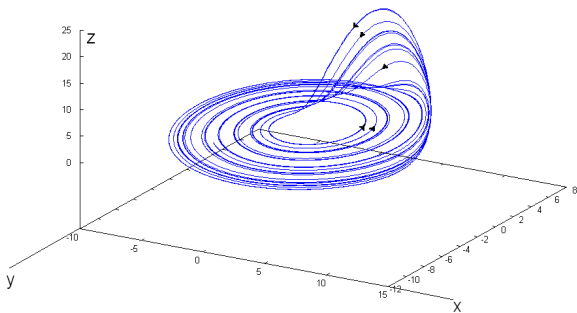


Рисунок 6 – Атрактор в системі координат  $xyz$

Властивість, що робить атрактор дивним — чутливість до початкових умов (коливання подачі, потужності приводу тощо). Ці коливання не описуються жодним з фізичних законів, тому можемо говорити про хаотичність їх проходження. А, як відомо, всі хаотичні атрактори вважаються дивними [5], бо їх поведінку в просторі неможливо спрогнозувати.

В математичній теорії динамічних систем введено в розгляд клас гіперболічних хаотичних атракторів, яким властива структурна стійкість («грубість»), що полягає в нечутливості структури атрактора до варіацій параметрів у визначаючих рівняннях [5]. В підручниках і наукових працях з нелінійної динаміки гіперболічні хаотичні атрактори представлені математичними конструкціями, такими як, наприклад, соленоїд Смейла – Вільямса.

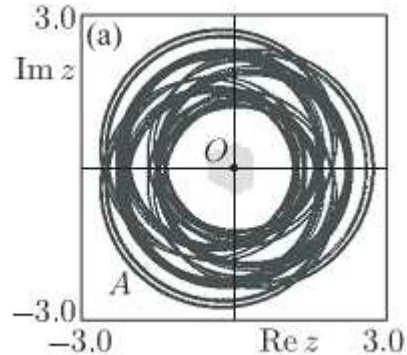
Сам соленоїд отримується шляхом розтягування тора в повздовжньому напрямку, стискання в поперечному, і складання навпіл (рис. 7). При цьому отриманий об'єкт візуально вписується в вихідну фігуру. При багатократному ітеруванні зображення в результаті отримуємо фрактальний атрактор з множини петель — соленоїд Смейла-Вільямса.



Рисунок 7 – Тороїдальна область та два кроки побудови соленоїда Смейла-Вільямса

На рис. 8 показана притягуюча нерухома точка  $O$  в центрі, навколо якої зображено межу

басейну притягання та сам атрактор, дійсний параметр якого  $R = 3,0$ . З його зменшенням множина траєкторій прямуватиме до меж басейну притягання. Межа басейну притягання не є колом, оскільки траєкторії руху є хаотичними інваріантними множинами з фрактальною структурою.



$O$  – центр басейну притягування атрактора,  
 $R = 3,0$

$Re z$  – дійсна частина,  
 $Im z$  – уявна частина атрактора

Рисунок 8 – Проекції хаотичної множини

Траєкторії руху точки віброрами, накладаючись, утворюють дивний атрактор гіперболічного типу, який за своєю формою нагадує соленоїд (атрактор) Смейла-Вільямса. Як і атрактори, траєкторія руху точок віброрами описується диференційними рівняннями (8) та (9), та є відкритою системою, що впливає на відхилення траєкторій від теоретично описуваних у класичних теоріях руху рам віброрита.

Віброрито є відкритою системою – системою, яка обмінюється речовиною і енергією з навколишнім середовищем. Зокрема, воно споживає енергію від електродвигуна, потужність якого коливається (змінюється) залежно від стрибків напруги в промисловій електромережі. Енергія двигуна перетворюється в коливальний рух віброрами, яка, в свою чергу, передає енергію поступального руху промивальної рідини та частинкам шламу, які рухаються ситополотном. Кількість промивальної рідини та шламу, що потрапляють на віброрито, залежить від багатьох факторів і є величиною, непостійною в часі. Енергія впорядкованого руху, яка спричиняє коливання віброрами, після потрапляння на ситополотно промивальної рідини з частинками шламу переходить в енергію невпорядкованого руху, оскільки в кожен момент часу кількість промивальної рідини на ситополотні є різною.

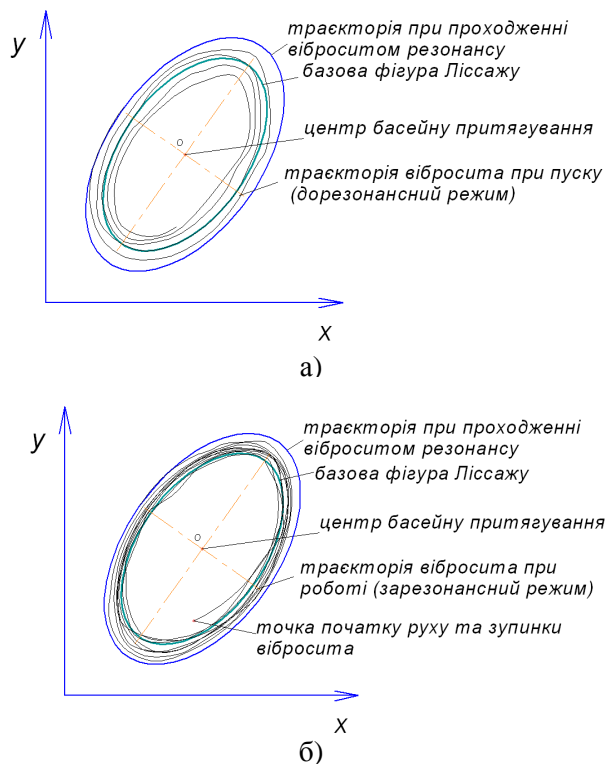
Згідно з теорією Пуанкаре множина траєкторій руху точки прагне наблизитись до базової траєкторії – фігури Ліссажу, проте за рахунок власних коливань пружини, які не співпадають з частотою коливань віброрами, та за рахунок змінних параметрів, що впливають на роботу віброрита (ваги промивальної рідини на ситополотні, стрибків потужності, в'язкості промивальної рідини тощо), спостерігаємо незначні



відхилення. Тобто можемо говорити про сідловий цикл системи – точки, які знаходяться з зовнішнього боку фігури Ліссажу, притягуються до центру, а точки, що знаходяться всередині, відштовхуються від центру (рис. 9).

Траекторія руху точки віброрами, як і атрактор Смейла – Вільямса, є замкнутою фігурою – при справному обладнанні за умови відсутності промивальної рідини на ситополотні та при справності віброопор будь-яка точка віброрами при зупинці віброрита повинна повернутись у вихідне положення, що спостерігалось до пуску його в роботу.

Як і для дивних атракторів, для траекторії руху точки віброрита характерні точки біфуркації. До них можна віднести точки, що фіксуються при проходженні віброрита через резонанс – вони утворюватимуть траекторію, що максимально віддаляється від базової фігури Ліссажу (рис. 9).



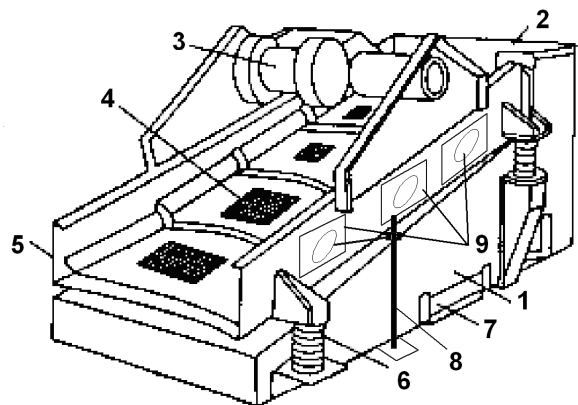
*а – пуск віброрита (дорезонансний режим) та вихід в резонанс; б – усталений режим роботи (зарезонансний) та зупинка віброрита*

**Рисунок 9 – Траекторія руху точки віброрами в площині  $xy$**

Коливання траекторії руху на рис. 9, а спричинені коливанням кількості промивальної рідини на ситополотні, а також зміною інших параметрів, про які вже говорилось вище. При накладенні графіків, зображених на рис. 9, а та рис. 9, б точки початку руху та зупинки віброрита співпадають, тобто траекторія руху є замкнутою фігурою, що властиво і для атрактора Смейла – Вільямса. Дані графіки утворюються при розв'язанні рівнянь (8) та (9).

Проте говорити про повну відповідність траекторії руху точки віброрами атрактору Смейла – Вільямса не варто, оскільки цей дивний атрактор є структурно стійким, на відміну від множини траекторій, утворених точкою при русі віброрами. До того ж, на відміну від гіперболічного атрактора, траекторія руху точки залежатиме від зовнішніх параметрів (кількості промивального розчину, що в даний момент часу знаходяться на ситополотні, стрибків напруги в приводі віброрита, збалансованості віброрита загалом, відсутності накопичення рідини, що очищується, з однієї сторони сито полотна, густини промивальної рідини, що очищується, тощо). Такий вплив зовнішніх чинників не характерний для дивних атракторів: для них переважаючий вплив мають початкові умови, що викликають коливання. Тобто можемо говорити про те, що точка віброрами описує квазіатрактор, який за своєю формою нагадуватиме дивний атрактор гіперболічного типу (соленоїд Смейла – Вільямса).

Отож, віброрита є відкритою системою, яка обмінюється з навколишнім середовищем потоками речовини (промивальний розчин) та енергією (коливання ситополотна), стан рівноваги втрачає стійкість. Візуально це складно зауважити, проте це просто довести експериментально, встановивши на віброриті реєстратор траекторії руху точки на віброрами. Реєстратор – це пишучий пристрій, встановлений нерухомо відносно основи блоку очищення, робочий наконечник якого дотикається до торця віброрами, на якій закріплено папір, на якому реєструватиметься траекторія (рис. 10). Зафіксувати рух одиничної точки віброрами можемо тільки в площині  $xy$ , оскільки для просторової фіксації потрібне більш складне реєструюче обладнання.



*1 – нерухома рама, 2 – завантажувальний бункер, 3 – вібродвигун, 4 – ситополотно, 5 – віброрама, 6 – віброопори, 7 – скидання очищеної промивальної рідини, 8 – реєструючий пристрій, 9 – місця реєстрації*

**Рисунок 10 – Реєстратор траекторії руху точки на віброрами**

**Висновки.** На основі аналізу досліджень, започаткованих в [1] та [2], вирішення проблеми впливу змінних параметрів на траекторію руху віброрами бурового віброрита встановле-

но, що не враховується маса промивальної рідни, шламу і глини, які знаходяться на ситополотні в певний період часу, а також недостатньо враховані технічні показники пружин.

У процесі дослідження встановлено, що основними змінними параметрами в часі є маса промивальної рідни, шламу і глини, які знаходяться на ситополотні, та значною мірою залежить від густини рідини та шламу, в'язкості рідини, вмісту шламу і глини в рідині. Загальна маса промивальної рідни, шламу і глини при русі ситополотном постійно змінюється. Ця величина не є прогнозованою в часі, і її важко описати законами фізики, тому вона підпорядковується законам хаосу. В математичній теорії динамічних систем введено розгляд класу гіперболічних хаотичних атракторів, що володіють структурною стійкістю. Хаотичні аттрактори можна представити математичними конструкціями, такими як соленоїд Смейла – Вільямса, який отримується шляхом розтягування тора в повздовжньому напрямку, стискання в поперечному і складанням навпіл.

Результат виконаних досліджень у даній статті є основою для проведення експериментальних досліджень та вирішення проблемних питань, пов'язаних з впливом змінних параметрів на траєкторію руху віброрами.

### **Література**

- 1 Бережницький Б.С. Дослідження кінематичних і динамічних параметрів вібросит / Б.С.Бережницький // Прикарпатський вісник НТШ. – 2016. – № 1(33). – С. 328–335.
- 2 Грабовский А.В. Динамика вибрационных машин и определение эксплуатационных нагрузок / А.В. Грабовский, И.А.Кириченко, Е.Н. Барчан, А.Г. Приймаков, Т.А.Васильева // Вісник НТУ «ХП». – 2013. – № 23(996). – С. 59–69.
- 3 Бауман В.А. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов / В.А.Бауман, И.И.Быховский, Б.Г. Гольдштейн. – М.: Машиностроение, 1970. – 548 с.
- 3 Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4. Вибрационные процессы и машины; под ред. Э.Э. Лавендела. 1981. – 509 с.
- 4 Лях М.М. Дослідження впливу коливальних рухів сітки на ефективність роботи вібросита / М.М. Лях, Н.В. Федоляк, В.М. Вакалюк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2015. – № 4(57). – С. 36–42.
- 5 Кузнецов С.П. Динамический хаос и однородно гиперболические аттракторы: от математики к физике // УФН. – 2011. – Т. 181. – № 2. – С. 121–149.
- 6 Исаева О.Б. Об одном бифуркационном сценарии рождения аттрактора типа Смейла–Вильямса / О.Б.Исаева, С.П.Кузнецов, И.Р.Сатаев, А.Пиковский // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9. – № 2. – С. 267–294.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
20.09.16*

*Рекомендована до друку  
професором **Копеєм Б.В.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
канд. техн. наук **Тарабаріновим П.В.**  
(НДПІ ПАТ «Укрнафта», м. Івано-Франківськ)*