

УДК 681.5.015:681.5.015.23

В.О. КОНДРАТЕЦЬ, А.М. МАЦУЙ, кандидати техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СТЕНДА, ЩО ФОРМУЄ КОЛИВАЛЬНИЙ ВЕРТИКАЛЬНИЙ РУХ РІДИНИ

Наведено результати математичного моделювання роботи стенда та оптимізації його конструктивних параметрів. Запропонована конструкція стенда, що формує коливальний вертикальний рух рідини.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. В Україні з кожним роком все більша частка залізних руд підлягає збагаченню, яке є матеріало- і енерговитратним. Недостатній рівень автоматизації галузі, який сильно залежить від відсутності або недосконалості інформаційних засобів, приводить до значних економічних втрат, що не відповідає реалізації передбаченого законодавством України напряму ресурсозберігаючих технологій у промисловості. Важливим тут стає можливе прискорення розробки та доведення існуючих інформаційних засобів до рівня технологічних вимог.

При розробці нових інформаційних засобів і перевірці придатності існуючих до конкретних технологічних умов широко використовують стенди, оскільки такі дослідження у промислових умовах вимагають великих матеріальних витрат і втрат часу або зовсім неможливі. Здебільшого виготовляють спеціальні стенди в процесі розробки конкретних технічних засобів, які враховують як технологічні умови, так і особливості створеної апаратури. Однак більш доцільно використовувати універсальні стенди, які слугують для різних досліджень. Наприклад, у збагачувальній галузі розповсюдження отримали установки для дослідження режимів роботи кульових млинів, у будівельній – млини зі змінними барабанами. У промисловості існує значна кількість технологічних апаратів, де виникають процеси з хвильовим або іншим вертикальним переміщенням рідини, у яких визначають рівень, тиск, концентрацію. Характерними представниками такого обладнання є завиткові живильники. Фізичне моделювання процесів у них шляхом створення діючого стенда показало складність, витратність, значні втрати часу, несумісність габаритів установки з реальними розмірами апаратури. Як видно, розробка інформаційних засобів на базі вузькопрофільних стендів сильно гальмує їх розробку, впровадження і приводить до значних перевитрат коштів. Відсутність універсальних стендів такого призначення не дозволяє знайти підходи до розв'язання цієї задачі. Тому тема статті, присвяченої створенню та оптимізації параметрів універсального стенда з коливальним вертикальним рухом рідини, є актуальною.

Матеріали даної публікації отримані в результаті виконання науково-дослідної роботи “Система комп'ютерної ідентифікації співвідношення тверде/рідке при подрібненні пісків класифікатора” (державний реєстраційний номер 0107U005470), яка спрямована на реалізацію Державної науково-технічної програми “Ресурсозберігаючі технології нового покоління в гірничо-металургійному комплексі”.

Аналіз досліджень та публікацій. Задачі розробки і використання вузькопрофільних стендів для проведення наукових досліджень розв'язуються науковцями давно. Значний термін часу будують і застосовують певні універсальні стенди. Досвід створення стендів даного призначення практично відсутній. Підвищити ефективність розроблення і впровадження технічних засобів контролю технологічних параметрів з складним рухом вимірюваного середовища можливо лише використанням універсального стенда з формуванням коливального вертикального руху рідини, який був би простим, нематеріалоемким і сумісним з реальними розмірами інформаційних засобів. Однак таких стендів ніхто не розробляв. Авторами даної публікації запропоновано підхід створення такого універсального стенда і знаходження найкращих конструктивних параметрів його базових вузлів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є пошук найкращих конструктивних рішень параметрів універсального стенда, що формує коливальний вертикальний рух рідини, шляхом його математичного моделювання та оптимізації.

Викладення матеріалу та результати. У технологічних процесах з хвильовими коливаннями середовища вертикальний рух рідини здебільшого виникає в резервуарах з прямокутним перерізом. Тому базовим елементом стенда повинен бути резервуар з прямокутним поперечним

перерізом, у якому засоби вимірювання технологічних параметрів встановлюють у донній частині і вони займають всю його висоту. Це вимагає подачі рідини знизу у донну частину. Коливальний вертикальний рух рідини можливо забезпечити регулюванням її впуску та випуску у донній частині, однак швидкі зміни рівня, які часто виникають у технологічних процесах, таким підходом забезпечити неможливо. Найбільш простим і високодинамічним може бути регулювання рівня у системі сполучених резервуарів. Виконаємо у базовому резервуарі у донній частині патрубок з великим поперечним перерізом, з'єднаємо його гнучким коротким гофрованим рукавом з іншим резервуаром з прямокутним перерізом, який в нижній частині має вісь, навколо якої може здійснювати коливальні рухи. При нахиленні рухомого резервуара рідина в ньому опускається, що спричиняє падіння рівня і в основному нерухомому резервуарі. Підняття рухомого резервуара спричиняє зростання рівня рідини. Оскільки резервуари зв'язані між собою каналом з великим поперечним перерізом, то такі зміни відбуваються практично миттєво, тобто, така конструкція забезпечує високу динаміку зміни рівня рідини. Переміщення рухомого резервуара можливо здійснювати повзуном, що рухається у направляючих.

Базовим елементом стенда є нерухомий резервуар, в якому встановлюються на дослідження вимірювальні засоби. Виходячи з цього, його габарити повинні бути такими, щоб задовольнити розмірам вимірювальних засобів і змінам рівня рідини в технологічному процесі. Отвір для введення знизу рідини повинен бути відділеним від вимірювальних засобів для позбавлення впливу потоку на їх роботу. Отже, даний конструктивний елемент є основою стенда, оскільки прямо визначає об'єм рідини в ньому, габарити усієї установки. Зрозуміло, що за певних умов характеристики стенда будуть найкращими. Їх можливо відшукати в процесі оптимізації конструктивних параметрів стенда.

Оптимізація передбачає знаходження математичної моделі об'єкта. У даному випадку необхідно знайти статичну математичну модель об'єкта оптимізації. Сумарна кількість рідини, яка знаходиться в стенді, дорівнює об'єму V_0 рідини в нерухомому і рухомому резервуарах, збільшеному на об'єм V_{II} рідини в перехідному рукаві. Оскільки об'єм рідини в перехідному рукаві не змінюється, то можливо розглядати лише об'єм V_0 заправленої рідини в стенд, який визначає задане середнє значення її рівня в нерухомому резервуарі.

Математична модель об'єкта оптимізації повинна аналітично зв'язувати значення рівня рідини H в нерухомому резервуарі з кутом нахилу рухомого резервуара та їх конструктивними параметрами. Геометричні зв'язки у рухомому резервуарі видно з рис. 1.

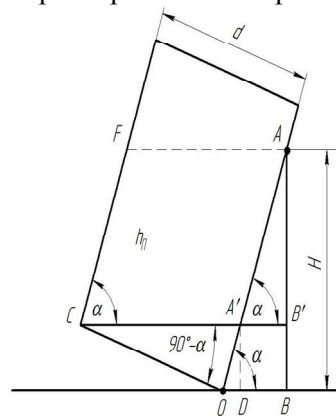


Рис. 1. Геометричні зв'язки у рухомому резервуарі

З трикутника $A'OC$ довжина сторони $A'O = d \operatorname{ctg} \alpha$, а довжина сторони $A'D$ з трикутника $A'DO$ дорівнює $A'D = A'O \sin \alpha$ або $A'D = d \operatorname{ctg} \alpha \cdot \sin \alpha$. Рівень рідини H у рухомому резервуарі $H = AB' + B'B$ або $H = AB' + A'D$, звідки

$$AB' = H - A'D = H - d \operatorname{ctg} \alpha \cdot \sin \alpha. \quad (1)$$

Площа рідини у нормальному перерізі рухомого резервуара, перпендикулярному осі його коливань, дорівнює сумі площ трикутника $A'OC$ і паралелограма $AA'CF$, основу якого CA' з трикутника $A'OC$ можна знайти як $CA' = d / \sin \alpha$. Тоді площа рідини у перерізі, що розглядається, буде дорівнювати

$$S_p = \frac{d^2 \operatorname{ctg} \alpha}{2} + \frac{d}{\sin \alpha} (H - d \operatorname{ctg} \alpha \cdot \sin \alpha). \quad (2)$$

Позначивши ширину рухомого резервуара через c , визначимо об'єм рідини в ньому за даних умов нахилу

$$V_p = c \left[\frac{d^2 \operatorname{ctg} \alpha}{2} + \frac{d}{\sin \alpha} (H - d \operatorname{ctg} \alpha \cdot \sin \alpha) \right]. \quad (3)$$

Позначивши довжини нормального перетину нерухомого резервуара через a і b , визначимо об'єм рідини в ньому за даних умов нахилу

$$V_H = abH. \quad (4)$$

Повний об'єм рідини в резервуарах буде дорівнювати

$$V_0 = abH + c \left[\frac{d^2 \operatorname{ctg} \alpha}{2} + \frac{d}{\sin \alpha} (H - d \operatorname{ctg} \alpha \cdot \sin \alpha) \right]. \quad (5)$$

Виконавши перетворення виразу (5), визначимо з нього значення рівня рідини H в нерухомому резервуарі

$$H = \frac{V_0 + \frac{cd^2 \operatorname{ctg} \alpha}{2}}{ab + \frac{d}{\sin \alpha}}. \quad (6)$$

Вираз (6) є статичною математичною моделлю стенда. З нього видно, що рівень рідини в нерухомому резервуарі залежить від кута нахилу α рухомого резервуара і визначається об'ємом V_0 первісного заповнення стенда робочим середовищем і конструктивними параметрами a , b , c і d .

Для оптимізації конструктивних параметрів стенда необхідно обґрунтувати критерій оптимальності, який слід формулювати з фізичного змісту задачі. У даному випадку найкращими будуть характеристики стенда при забезпеченні найбільшої чутливості зміни рівня рідини H до зміни кута нахилу α рухомого резервуара. Тобто, критерієм оптимальності J буде

$$J = \frac{dH}{d\alpha} \rightarrow \max. \quad (7)$$

Вираз (6) дозволяє знайти аналітичне значення критерію оптимальності, який дорівнює

$$J = \frac{cd \left(2V_0 \cos \alpha - abd - \frac{cd^2}{\sin \alpha} (1 + \cos^2 \alpha) \right)}{2(ab \sin \alpha + cd)^2}. \quad (8)$$

З формул (6) і (8) видно, що H і J залежать від кута нахилу рухомого резервуара α і визначаються параметрами стенда V_0 , a , b , c і d . Причому, параметри ab входять до (6) і (8) як площа поперечного перерізу нерухомого резервуара, а параметри c і d – більш складніше. З одного боку, як площа поперечного перерізу рухомого резервуара cd , з іншого – як незалежні параметри з самостійним значенням c , d і d^2 . За цих умов необхідно знайти найкращі параметри стенда – початкове значення кута α_0 , його відхилення від початкового значення, параметри c і d при обраних a і b .

Розв'язання задач оптимізації завжди зв'язане з визначенням обмежень на параметри. Обмеження на кут нахилу рухомого резервуара α витікають з найбільшого та найменшого значень рівня при найбільшому вмісті робочого середовища V_0 . Найбільше значення кута α відповідає максимальному рівню H в нерухомому резервуарі, що можливо при 90° . Найменше значення рівня H визначається більш складно, оскільки залежить крім V_0 і від параметрів a , b , c і d . Аналіз показує, що ця границя може бути на рівні $20^\circ \dots 30^\circ$. Тоді обмеження на кут α нахилу рухомого резервуара можна записати у вигляді

$$20^\circ \dots 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ. \quad (9)$$

Обмеження на розміри нормального поперечного перерізу нерухомого резервуара можливо висунути з наступних міркувань. Як вже було відмічено, ці розміри повинні бути мінімальними. Для універсального стенда їх необхідно обґрунтувати, враховуючи коливальні технологічні процеси та їх особливості. Аналіз показав, що граничним за розмірами нерухомого резервуара виступає завитковий живильник, у якому середнє значення рівня може доходити до 500 мм, а два вертикальних паралельно встановлених перетворювачі мають зовнішній діаметр $d_3 = 108$ мм – це останні досягнення у вимірюванні даних технологічних величин. Позначимо ширину нерухомого резервуара через a . Враховуючи, що перетворювачі можуть бути рухомими або дещо зміненими за розміром, можна ввести обмеження

$$a \geq d_3 + 2 \cdot \Delta, \quad (10)$$

де Δ – зазор між перетворювачем та стінкою резервуара.

Зазор може дорівнювати 26 мм, тоді для даного випадку $a \geq 160$ мм. Ширину нерухомого резервуара доцільно прийняти при найменшому значенні, тобто $a = 160$ мм.

Параметр b буде складати довжину нерухомого резервуара. Для неї обмеження можливо подати залежністю

$$b \geq 2d_3 + 2d_{3П} + l_{П} + 2 \cdot \Delta, \quad (11)$$

де $d_{зп}$ – зовнішній діаметр зливного патрубку; $l_{п}$ – відстань між перетворювачами.

Для даного граничного випадку $b \geq 400$ мм, тобто $b = 400$ мм.

Обмеження на розміри нормального поперечного перерізу рухомого резервуара c і d сформулюємо наступним чином. При заповненні нерухомого резервуара завдяки зростанню кута α необхідно, щоб невеликі зміни $\Delta\alpha$ забезпечували перетікання якомога більшої кількості рідини. Це можливо, коли розмір c рухомого резервуара, розташований вздовж осі коливання, буде більшим d . Виходячи з умов наближеної рівності об'ємів рідини в обох резервуарах доцільно прийняти $c \approx b$, $d \approx a$, які слід уточнити в процесі оптимізації.

Аналіз виразу (8) показав, що критерій оптимальності екстремуму не має. Тому необхідно знаходити його найкраще значення. Оскільки критерій оптимальності повинен витікати з фізичної суті задачі, розглянемо її більш детально. Зміна кута нахилу α рухомого резервуара в межах $\alpha \approx 90^\circ$ не приводить до значного перетікання рідини в нерухомий резервуар. Тобто, тут чутливість буде найменшою. Навпаки, при малих кутах $\alpha \approx 20^\circ$ незначна зміна положення рухомого резервуара буде приводити до найбільшого перетікання рідини. Тобто, чутливість процесу буде зростати при зменшенні кута нахилу рухомого резервуара. З іншого боку, чутливість процесу не повинна суттєво змінюватись при роботі стенда. Тому найкраще буде працювати при середньому значенні чутливості, тобто $\alpha \approx 45^\circ \pm \Delta\alpha$, де $\Delta\alpha$ порівняно невеликий кут відхилення. За таких умов, $V_0 = 44800 \text{ см}^3$ і визначених a і b критерій оптимальності прийме значення, см/град

$$J = \frac{1.0606cd(29866.6667 - 301.7018d - cd^2)}{(452.544 + cd)^2}. \quad (12)$$

Підставимо в (12) $d = a = 16$ см і отримаємо J як функцію параметра c , см/град

$$J = \frac{16.9704c(97.81 - c)}{c^2 + 56.568c + 799.9847}. \quad (13)$$

Залежність (13) має екстремум. Аналіз показав, що перша похідна dJ/dc виразу (13) дорівнює нулю, коли її чисельник перетворюється в нуль, тобто

$$-c^2 - 10.364c + 506.8507 = 0, \quad (14)$$

звідки $c = 28,3$ см. Отже, оптимальне значення параметра $c = 28,3$ см.

Підставимо у вираз (12) знайдене значення $c = 28,3$ см і отримаємо критерій оптимальності як функцію параметра d , см/град

$$J = \frac{1.0606d(1055.409 - 10.6613d - d^2)}{d^2 + 15.991d + 115720.3031}. \quad (15)$$

Функція (15) має екстремум. Аналіз показує, що перша похідна $dJ/dd = 0$, коли її чисельник буде дорівнювати нулю, тобто

$$-d^4 - 10.6594d^3 - 348408.1262d^2 - 2467463.2383d + 122132250.967 = 0. \quad (16)$$

Розв'язок рівняння (16) дає корінь, що дорівнює $d = 15,5$ см, який є оптимальним значенням параметра.

Схема стенда, що формує коливальний вертикальний рух рідини, показана на рис. 2.

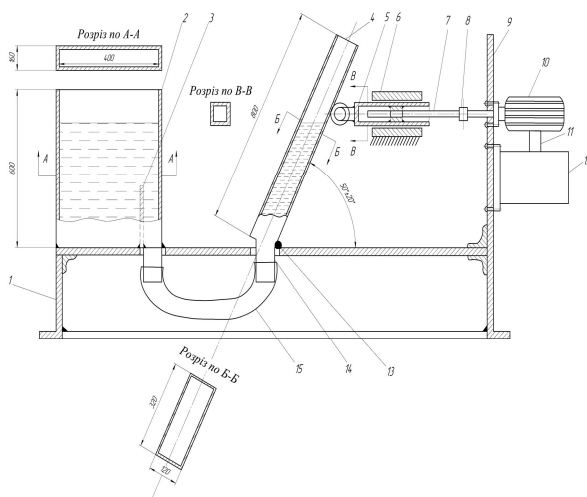


Рис. 2. Схема стенда, що формує коливальний вертикальний рух рідини: 1 – основа; 2 – нерухомий резервуар; 3 – перегородка; 4 – рухомий резервуар; 5 – повзун з кульовим підшипником і гайкою; 6 – направляюча повзуна; 7 – гвинт; 8 – муфта; 9 – стояк; 10 – електродвигун із змінним числом обертів; 11 – лінія електров'язку; 12 – блок керування; 13 – вісь обертання; 14 – патрубок; 15 – гнучкий рукав

У ході оптимізації параметрів стенда встановлено, що при $a = 160$ мм, $b = 400$ мм кут зміни положення рухомого резервуара повинен становити $\alpha \approx 45^\circ \pm 15^\circ$, $c = 283$ мм, $d = 155$ мм.

Експериментально підтверджені зміни рівня рідини у нерухомому резервуарі 2 у відповідності з програмою коливань, що формуються блоком керування.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Отже, однією з найкращих конструкцій стенда, що формує коливальний вертикальний рух рідини, є пристрій, який вміщує два резервуари з прямокутним перерізом – нерухомий і рухомий, що здійснює коливання відносно осі, прикріпленої до його днища. Вертикально встановлений нерухомий резервуар слугує імітатором руху рідини у технологічному агрегаті, його розміри визначаються габаритами чутливих елементів інформаційних засобів, які у ньому встановлюються. Рухомий резервуар виступає засобом зміни рівня рідини у часі в імітаторі технологічного агрегату. Габарити рухомого резервуара визначаються розмірами нерухомого. Для випадку випробування засобів вимірювання технологічних параметрів завиткового живильника при поперечному перерізі нерухомого резервуара 610 x 400 мм кут зміни положення рухомого резервуара повинен становити $\approx 45^\circ \pm 15^\circ$, а довжина – 155 мм і ширина – 283 мм.

При проведенні даних досліджень вперше запропоновано конструкцію універсального стенда, що формує коливальний вертикальний рух рідини і дозволяє випробувати інформаційні засоби без втрат часу, значних матеріальних витрат за умов зміни величини і закономірностей руху робочого середовища у широких межах. Отримане теоретичне обґрунтування стенда дозволяє легко знаходити його параметри для будь-яких інших засобів та умов їх роботи. Практична значущість проведених досліджень полягає у тому, що отримані конкретні найкращі конструктивні параметри стенда, які забезпечують самі високі його показники, зокрема, чутливість до зміни положення рухомого резервуара.

Проведені дослідження відкривають перспективу теоретичного обґрунтування, удосконалення системи управління переміщенням рухомого резервуара та ефективної розробки інформаційних засобів для різних технологічних процесів з коливальним вертикальним рухом рідини.

Рукопись поступила в редакцию 30.03.12