

Ю.Є. ЦИБУЛЕВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.,
А.М. ГРИЦЕНКО, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.,
О.В. ЧЕРКАСОВ, ст. наук. співроб., Криворізький національний університет
О.В. ШВИДКИЙ, інженер-програміст ТОВ «Рудпромгеофізика»

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РАДІОІЗОТОПНИХ ГУСТИНОМІРІВ

Мета. Визначити основні фактори, які впливають на точність роботи радіоізотопних густиномірів, що використовують для контролю густини залізородної пульпи. А також розробка засобів для компенсації впливу основних похибок, з яких складається сумарна абсолютна випадкова похибка, яка виникає під час контролю. Предметом дослідження було визначення ступеня ослаблення інтенсивності гамма-випромінювання у залежності від густини залізородної пульпи.

Метод. Для підвищення чутливості радіоізотопного густиноміра була розроблена функціональна схема цифрового датчика температурної компенсації сцинтиляційного детектора інтенсивності джерела гамма-випромінювання, а також запропоновані засоби деаерації пульпи.

Наукова новизна. У відомих густиномірах залежність вторинного гамма-випромінювання від густини пульпи описується лінійними або експоненціальними рівняннями першого порядку. При цьому джерело і детектор гамма-випромінювання непорушні одне відносно іншого та від рівня залізородної пульпи. Авторами розроблений пристрій у якому поєднані переваги поплавцевого та радіаційного густиномірів. У запропонованому пристрої джерело гамма-випромінювання вмонтоване у поплавець, при цьому опроміненість детектора зворотно пропорційна квадрату відстані від джерела випромінювання до детектора, що на порядок підвищує чутливість пристрою до густини залізородної пульпи.

Практична значимість. Підвищення на порядок чутливості радіаційного густиноміра визначає практичну значимість розробленого пристрою.

Результати. Впровадження нового густиноміру створює можливість заміни джерел гамма-випромінювання на джерела видимого спектра світла. При цьому зменшується ціна, вага пристрою і спрощується електронна схема густиноміру.

Ключові слова: густиномір, пульпа, похибка, точність вимірювання, поплавець, гамма-випромінювання, температурна компенсація.

doi:10.31721/2306-5435-2022-1-110-125-129

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Відомі такі конструкції густиномірів: поплавкові (ареометри, спиртометри, густиноміри для вина та пива, буйкові для контролю густини пульпи); гідростатичні (п'єзометричні); вібраційні, акустичні (ультразвукові), оптичні, вагові та радіоізотопні. На збагачувальних комбінатах Криворізького басейну найбільшого поширення набули вагові та радіоізотопні методи контролю щільності залізородної пульпи [1]. Густина пульпи впливає на продуктивність, якість подрібнення та на процес флотації. Недоліком вагових густиномірів є додаткові витрати часу на контроль зносу та замулювання вимірювальної ділянки трубопроводу, що призводить до необхідності додаткового обслуговування.

Аналіз досліджень та публікації. Радіоізотопний густиномір здійснює безконтактний контроль залізородної пульпи на трубопроводах з внутрішнім діаметром від 100 до 800 мм при товщині стінок сталевого трубопроводу 10-20 мм. Радіоізотопні густиноміри можуть працювати у двох режимах:

метод розсіювання гамма-випромінювання (МРГ) на поверхнях ґрунту, стінках гірничих виробок та геофізичних свердловин;

метод поглинання (МПП) гамма-випромінювання на трубопроводах та конвеєрах. При цьому густиноміри МПП набули значно більшого поширення, що пов'язано з вимогами існуючих технологій.

Розробці радіоізотопних пристроїв присвячено велику кількість робіт. Найбільш докладно дослідження автоматичного контролю щільності залізородної пульпи гамма-променями викладені у монографії [1]. Вимоги до роботи цих приладів регламентовані в нормативних документах ГОСТ 20180-91 «Плотномеры радиоизотопные жидких сред и пульп» [2]. Міждержавні загальні технічні умови ДСТУ ГОСТ 8.368:2009 ДСВ. «Щільноміри радіоізотопні рідких середовищ і пульп». Методи і засоби повірки [3], в яких регламентовано:

межа допустимої відносної похибки;
межа допустимої відносної випадкової складової похибки.

Підприємства гірничорудної промисловості висувають вимоги до підвищення чутливості та стабільності роботи радіаційних густиномірів.

Постановка задачі. Метою даної роботи є підвищення точності радіоізотопних густиномірів за рахунок стабілізації параметрів детектора гамма-випромінювання та подальше вдосконалення конструкції густиноміру.

Викладення матеріалу та результати. У технічній літературі чутливість густиноміра визначають як відношення зміни вихідного сигналу приладу до зміни щільності, що викликала цю зміну

$$Q = X_{ex} / X_{eux} \quad (1)$$

За законом Бугера-Ламберта-Бера пучок випромінювання інтенсивністю Φ_n при проходженні через шар поглинаючої речовини завтовшки l послаблюється до інтенсивності Φ_p [4]. Кількість імпульсів зареєстрована детектором гамма-випромінювання за час t_e залежить від густини пульпи

$$N(\rho) = \Phi_n \varepsilon e^{-\mu l(\rho-\rho')} + \Phi_\phi \varepsilon_{m,\varepsilon} \quad (2)$$

де Φ_p - потік гама-випромінювання ослаблений шаром пульпи, імп/с; Φ_n - початковий потік гама-випромінювання, імп/с; Φ_ϕ - потік фонового гамма-випромінювання, імп/с; μ - масовий коефіцієнт ослаблення випромінювання, см²/г; l - товщина шару рідини, що просвічується, см; $\rho - \rho'$ - діапазон зміни густини пульпи, г/см³.

Радіоактивне випромінювання характеризують величиною його інтенсивності I та швидкістю реєстрації імпульсів $N=I \cdot t_e$, де ε - ефективність датчика гама-випромінювання. Тоді кількість імпульсів з детектора, зареєстрована за час вимірювання t_e однозначно залежить від густини. Звідси випливає, що з урахуванням схемного коефіцієнта перерахунку імпульсів показання на шкалі приладу дорівнюють вимірюваному значенню густини. Величина вимірюваного значення густини пульпи ρ_x залежить не тільки від дійсного значення густини пульпи, але і від первинного потоку джерела гама-випромінювання Φ_n , від ефективності датчика, від фонового потоку випромінювання і від зміни товщини шару пульпи, що просвічується. Детальний аналіз похибок, що виникають при вимірюванні густини пульпи, можливий шляхом визначення частинних похідних від перерахованих величин, що входять до виразу (2).

Відносна похибка вимірювання струму детектора дорівнює сумі статистичної, методичної та апаратної. Середньоквадратична похибка ефективності датчика враховує всі апаратні похибки – у тому числі параметри сцинтилятора, фотоелектронного підсилювача (ФЕПу) та деталей вимірювального блоку. Абсолютна випадкова похибка вимірювання щільності пульпи складається із суми наступних похибок [4]:

статистична похибка залежить від інтенсивності радіоактивного розпаду джерела випромінювання, її враховують при розрахунку мінімальної активності випромінювача, а також оптимальної товщини вимірюваного потоку пульпи

$$l_{opt} = 2 / \mu l \rho \quad (3)$$

Для збільшення чутливості потрібно збільшити активність випромінювача, що призведе до збільшення струму детектора.

методична похибка враховує зміну товщини потоку пульпи з допомогою корозії чи обростання стінок трубопроводу, і навіть коли у потоці з'являються бульбашки повітря;

апаратна похибка залежить від теплової та температурної стабільності роботи елементів радіоелектроніки, що входять до схеми радіаційного густиноміру, апаратна похибка визначається окремо для похибки, яка залежить від потоку випромінювання і для похибки, яка не залежить від потоку випромінювання (дрейф нуля).

При підстановці чисельних значень параметрів, що входять до виразу абсолютної випадкової похибки вимірювань щільності пульпи, можна визначити відсотковий внесок кожної з розглянутих похибок у сумарну похибку.

Результати обчислень наведено у табл. 1. Очевидно, що на похибку вимірювань найбільший вплив має ефективний лінійний коефіцієнт ослаблення випромінювання, зміна товщини стінки пульпопроводу та потоку пульпи.

Відсотковий вклад окремих похибок у сумарну абсолютну випадкову похибку

Найменування похибки	Вклад, %
Статична	13,7
Апаратурна, що залежить від потоку випромінювання	55,56
Апаратурна, що не залежить від потоку випромінювання	18,52
Методична	12,22
Всього	100

Залежність густини пульпи від температури. Зміну об'єму пульпи можна визначити через коефіцієнт об'ємного розширення, який для води прийнято рівним $18 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹. Тоді залежність густини пульпи від температури води можна визначити за виразом

$$\rho = 1,0016 - 18 \cdot 10^{-5} t. \quad (4)$$

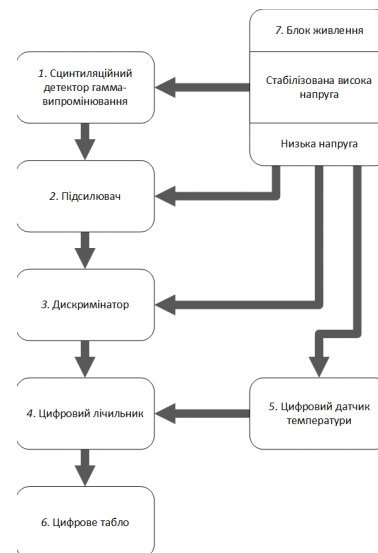
Очевидно, що зміна температури води викликає значну зміну розмірів трубопроводу, твердої складової пульпи, і чутливості детектора гамма-випромінювання, що призводить до додаткової похибки вимірювань.

Для зменшення впливу температурної похибки було використано спосіб цифрової корекції температури. Коливання температури поруч із радіоізотопним густиноміром можуть не впливати на температуру пульпи, але можуть бути джерелом похибки для детектора гамма-випромінювання та інших елементів схеми.

Зміна температури детектора на 1° змінює інтенсивність світловіддачі люмінофора на 1%. Тому детектори гамма-випромінювання потрібно термостабілізувати або вводити вузол температурної компенсації в електронну схему радіаційного густиноміру. У межах зміни температури від +10 до +70 °С вихідна характеристика детектора має лінійний характер.

Авторами цієї статті розроблено пристрій для підвищення точності сцинтиляційних детекторів шляхом введення цифрового датчика для температурної корекції, на який виданий патент України на корисну модель [5]. Функціональна схема сцинтиляційного датчика гамма-випромінювання з температурною компенсацією наведена на рис. 1.

Рис. 1. Функціональна схема сцинтиляційного датчика з температурною компенсацією; 1 - детектор гамма-випромінювання з фотоелектричним підсилювачем (ФЕП); 2 – підсилювач; 3 – дискриміратор; 4 - цифровий лічильник; 5 - цифровий датчик температури; 6 - стабілізований блок живлення високої та низької напруги



Перевага пропонованого радіаційного густиноміра полягає в тому, що компенсація температурної залежності фотокатода і стабілізація високої напруги підвищує точність вимірювання потоку гамма-квантів, які пройшли крізь пульпопровід.

Середня густина пульпи визначається при заданих температурі та тиску за відсутності компенсаційних факторів. У зв'язку з тим, що рідина не стискається зміною тиску можна знехтувати. На результат вимірювань впливають коливання розміру та щільності твердих частинок та наявність повітряних бульбашок. Контроль густини пульпи потрібно проводити на ділянках, вільних від газових включень, або використовувати спеціальні пристрої дегазації пульпи. Для відділення повітря можна застосувати комплексну апаратуру ОДЛ ПОР-1 [8]. Турбулентність руху пульпи запобігає осіданню твердих частинок на стінках пульпопроводу та зменшує ступінь неоднорідності суспензії.

Для того, щоб зменшити вплив речовинного складу пульпи, ефективний атомний номер яких $Z > 35$ використовують джерела жорсткого радіоактивного випромінювання $Co-60$ $Cs-137$ з енергією гамма-квантів (0,4-2,0) МеВ. Для зменшення маси та габаритів біологічного захисту в більшості конструкцій розробники вважають за краще використовувати як менше жорстке джерело випромінювання ізотопу $Cs-137$. Межа похибки вимірів $\pm 1\%$.

При компенсації змін температури та напруги живлення мінімальна межа виміру $0,03$ г/см³. Чутливість радіаційного густиноміра з радіоізотопною компенсацією геометрії вимірювань за

допомогою додаткового датчика гамма-випромінювання забезпечує чутливість вимірювань $0,001 \text{ г/см}^3$. На підставі аналізу роботи відомих густиномірів авторами розроблена нова конструкція, схематичне зображення якої наведено на рис. 2, в якій об'єднані переваги поплавкового та радіоізотопного густиномірів.

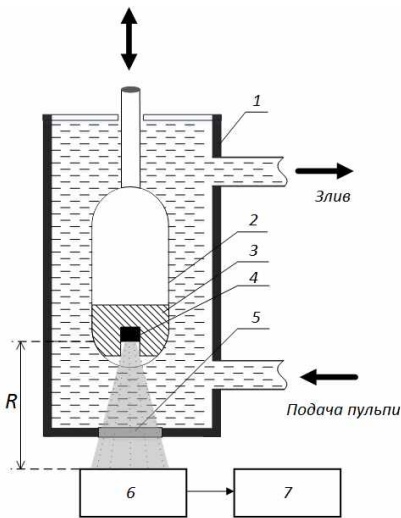


Рис. 2. Радіоізотопний поплавковий густиномір; 1 - Корпус переливної судини; 2 – поплавок; 3 - свинцевий екран; 4 - джерело гамма-випромінювання; 5 - вікно коліматора; 6 - детектор гамма-випромінювання; 7 - реєстратор густини пульпи

Точність визначення густини пульпи збільшується на порядок: тому що інтенсивність реєстрованого гамма-випромінювання зростає обернено пропорційно квадрату відстані $j=1/R^2$ між джерелом і детектором гамма-випромінювання. Однопроцентна зміна кількості імпульсів може бути виміряна з необхідною точністю і граничне значення густини може бути визначено з точністю до 10^{-5} г/см^3 .

Крім того, не потрібен додатковий поплавок для підтримки кабелю зв'язку між детектором і вимірювальною системою.

Засоби підвищення точності та стабільності роботи радіоізотопних приладів більш докладно викладені авторами у літературі [6,7]. Розширення функціональних можливостей

поплавкових датчиків наведені авторами у літературі [9].

Висновки та напрямки подальших досліджень. Використання цифрової компенсації температурних коливань сцинтиляційного детектора гамма-випромінювання, а також конструктивне рішення щодо розміщення елементів нерухомо на поплавці спрощує схему радіоізотопного густиноміра та на порядок підвищує його чутливість. Серед напрямків подальших досліджень розглядається обґрунтування параметрів елементів конструкції розробленого густиноміра для заміни радіоактивних джерел на випромінювачі видимої частини оптичного спектру для контролю густини суспензій [10].

Відмова від радіоактивних джерел дозволяє зменшити вагу та вартість випромінювача, а також значно спростити електронну схему густиноміра.

Список літератури

1. Вальтер А.К., Плаксин И.Н., Гольдин М.Л. Автоматический контроль плотности железорудной пульпы гамма-лучами / Харьков, изд-во ХГУ, 1962. -244 с.
2. ГОСТ 20180-91 «Плотномеры радиоизотопные жидких сред и пульп. Межгосударственные общие технические условия».
3. «Методы и средства поверки радиоизотопных плотномеров» / ДСТУ ГОСТ 8.368:2009 ГСИ.
4. Крейншлин И.И. Анализ погрешностей радиоизотопных приборов / И.И. Крейншлин, Л.В. Матвеев // Сб. «Радиационная техника». – 1969. - Вып. 3. - М. - С. 28.
5. Пат. №66423 Україна, G01T 1/00. Датчик гамма-випромінювання / [А.А. Азарян, В.В. Дрига, Ю.Е. Цыбулевський, Д.Ю.], заявл. 21.02.2011 опубл. 10.01.12. Бюл. №1.
6. Азарян А.А. Исследование факторов, влияющих на точность оперативного контроля качества минерального сырья / А.А. Азарян, В.А. Азарян, В.Е. Василенко, Г.Н. Лисовой, А.А. Трачук // Разраб. рудн. месторожд. Научно-техн. сб. – Кривой Рог, 2005 - № 68, – С. 135-140.
7. Азарян А.А. Методы стабилизации параметров сцинтиляционных датчиков гамма-излучения // А.А. Азарян В.В. Дрига, Ю.Е. Цыбулевський Ю.Е. // Сб. научных трудов «Качество минерального сырья» - Кривой Рог – 2017 - Том 1. - С.283-291.
8. Головкин Б.Ю., Рейбман Л.А., Колпиков Г.Г. Системы и средства автоматизации обогатительных фабрик. - М.: Недра, 1990. - 232 с.
9. Кучер В.Г. Увеличение функциональных возможностей поплавковых датчиков / В.Г. Кучер, Ю.Е. Цыбулевський // Сб. науч. тр. «Качество 2014» - Кривой Рог, 2014. - С. 130-133.
10. Скорбилин С.Ф. Автоматические плотномеры. –М.: Пищепромиздат, 1955. – 230 с.

Рукопис подано до редакції 17.04.22