

ОСНОВНІ ПОХИБКИ БАЛІСТИЧНОГО ГРАВИМЕТРА

О.М. Безвесільна, Т.О. Толочко, Д.В. Трохимчук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37. E-mail: prilad168@gmail.com, asnk@kpi.ua

Встановлено, що на сьогоднішній день відсутня інформація про розрахунок та оцінку основних похибок балістичних лазерних гравіметрів та рекомендації по їх зменшенню. Тому метою даної роботи є розрахунок і проведення аналізу основних похибок балістичного лазерного гравіметра. Пробна маса у період вільного падіння знаходиться у взаємодії з усіма фізичними об'єктами всесвіту, які за допомогою гравітаційних та інших сил впливають на закон руху пробного тіла. Виключення впливу інерційних сил на результати вимірювання гравіметра є на даний момент часу одними з основних труднощів на шляху підвищення точності визначення прискорення сили тяжіння (ПСТ). Шлях, що пройшла пробна маса, вимірюється відносно інерційної системи координат, яка не є абсолютно інерційною. Тому кінематичні похибки можна розділити на дві групи: обумовлені впливом факторів, що діють на пробне тіло, та ті, що діють на інерційну систему відліку координат пробної маси. Сукупність показників вказаних похибок дозволяє визначити структуру показників точності балістичного гравіметра. Проблема відтворення одиниць довжини та часу в абсолютній гравіметрії зводиться переважно до підвищення точності та тривало-часової стабільності їх відтворення, оскільки саме похибки цих одиниць є основною перешкодою у підвищенні точності вимірювання ПСТ. Встановлено, що точність визначення ПСТ залежить від точності вимірювання наступних величин: шляху пробного тіла; ступеня фіксації інерційної системи, відносно якого вимірюються шляхи; часу; гравітаційних сил; інерційних сил. Визначено, що вимірювання прискорення сили тяжіння точніше ніж 10^{-9} принципово неможливо внаслідок квантово-механічних обмежень, а також – флуктуацій мір довжини та часу. Бібліогр. 29, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: прискорення сили тяжіння, балістичний лазерний гравіметр, похибки, пробне тіло

Вступ. Вимірювання абсолютного значення прискорення сили тяжіння g з високою точністю необхідне для вирішення широкого спектру наукових задач: визначення форми Землі, побудови моделей руху глибинних мас, оцінки пружних деформацій поверхні планети, передбачення землетрусів, винаходження глибинних щільнісних неоднорідностей, пошуку покладів корисних копалин та ін. Для визначення g призначені гравіметри. Серед них найвідомішими для наземних вимірювань є балістичні лазерні гравіметри (БЛГ) [1–29]. Однак вони не автоматизовані, мають низьку точність і швидкодію, що є неприпустимим для сучасного використання. Тому дослідження можливості підвищення точності та швидкодії БЛГ шляхом застосування цифрового двовимірного відеозображення є актуальною задачею.

Теорія та практика абсолютної гравіметрії на базі балістичних методів (терміни «абсолютний» і «балістичний» є синонімами) вимірювання є надзвичайно перспективними. Балістичні методи вимірювання прискорення сили тяжіння (ПСТ) для різних високоточних вимірювань можна вважати технічно забезпеченими, хоча ще мають місце розходження в результатах, одержаних різними приладами за однакових умов. Розповсюдження балістичних гравіметрів підтверджено великою кількістю приладів, що знаходяться в експлуатації, великим попитом на балістичні гравіметри серед практиків [6, 7]. На сьогоднішній день відсутня інформація про розрахунок та оцінку основних похибок БЛГ, рекомендації по їх зменшенню.

Мета роботи – розрахунок і проведення аналізу основних похибок балістичного лазерного гравіметра.

Аналіз досліджень і публікацій. Проведені дослідження показали, що великий внесок у розвиток методів і засобів гравіметричних вимірювань внесли наукові школи, сформовані в Інституті геофізики під керівництвом академіка НАНУ В.І. Старостенка (м. Київ), в ННЦ «Інститут метрології» під керівництвом к.т.н. Г.С. Сидоренка і КПІ ім. Ігоря Сікорського на приладобудівному факультеті під керівництвом д.т.н., проф. О.М. Безвесільної.

Сучасні дослідження в області розробки гравіметричної апаратури зосереджені у двох основних напрямках: перший – підвищення точності вимірювань g балістичними гравіметрами шляхом усунення впливу сейсмічних коливань на процес вимірювання, другий – побудова ефективних автоматизованих систем процесу гравіметричних вимірювань.

Найвідомішими у галузі гравіметричних вимірювань є роботи Л. Ла-Коста, Д. Гаррисона, А. Графа, Ю. Престона-Томоди, М. Гальвані, Кука, Тейта, Фаллера та інших [4, 5, 8–13].

Викладення основного матеріалу дослідження. Вільно падаюче тіло рухається у просторі під дією деякої рівнодіючої сили F , що дорівнює векторній сумі всіх сил, відомих у природі: гравітаційних, електромагнітних, аеродинамічних та ін. У цьому випадку:

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i. \quad (1)$$

Розкладемо множину сил F_i на дві підмножини: гравітаційні та інерційні сили, які, відповідно, позначимо: $\sum \vec{F}_i^{(r)}$ та $\sum \vec{F}_i^{(i)}$.

О.М. Безвесільна – <https://orcid.org/0000-0002-6951-1242>, Т.О. Толочко – <https://brcid.org/0000-0002-2346-0419>

© О.М. Безвесільна, Т.О. Толочко, Д.В. Трохимчук, 2024

Причому будь-яка гравітаційна сила може бути записана у вигляді:

$$\bar{F}_k^{(r)} = \gamma \cdot \left(\frac{m \cdot M_k}{R_k^3} \right) \cdot \bar{R}_k, \quad (2)$$

де γ – гравітаційна стала; m – маса пробного тіла; M_k – гравітаційна маса; R_k – відстань між центрами мас M_k і m .

Будь-яка інерційна сила записується наступним чином:

$$F_k^{(i)} = \bar{x}_n \cdot m, \quad (3)$$

де $\bar{x}_n$ – парціальне прискорення пробного тіла.

З урахуванням рівнянь (1) і (2), суму рівнянь (3) можна записати у наступному вигляді:

$$\bar{F} = m \cdot \left[\gamma \cdot \sum_i \frac{M_i}{R_i^3} \bar{R}_i + \sum_i \bar{x}_i \right], \quad (4)$$

де величина, що стоїть дужках, – прискорення, що включає ПСТ g .

Розв'язавши це рівняння відносно g , одержимо:

$$g_0 = 2 \cdot S \left[t^2 - \left(\sum_i \bar{F}_k^{(r)} + \sum_i \bar{F}_i^{(i)} \right) \right] \cdot m, \quad (5)$$

звідки випливає, що точність визначення g_0 залежить від точності вимірювання наступних величин:

- шляху S пробного тіла;
- ступеня фіксації інерційної системи, відносно якої вимірюють шлях S (тобто від точності S_0 і V_0);
- часу t ;
- гравітаційних сил, що складають множину $F_i^{(r)}$;
- інерційних сил, що складають множину $F_i^{(i)}$.

Фактори F під знаком суми рівняння (5) можна умовно розділити на локальні, регіональні та глобальні [14, 17–21]. До локальних відносяться градієнти гравітаційного поля та температури, електричні та магнітні поля у приміщенні, де відбувається робота. До регіональних – зміни гідрологічних умов і висоти місця спостережень, барометричні ефекти, сейсмічна та вулканічна активність у регіоні тощо. До глобальних факторів відносяться, в першу чергу, приливні зміни та, меншою мірою, такі явища, як рух полюсів Землі, нерівномірність обертання планети, астрофізичні явища тощо.

Аналіз рівняння (5) дозволяє побачити, що пробна маса в період вільного падіння знаходиться у взаємодії з усіма фізичними об'єктами всесвіту, які за допомогою гравітаційних та інших сил впливають на закон руху пробного тіла. Тому визначення всіх взаємодій є надзвичайно складною задачею.

У сучасній гравіметрії сумарна взаємодія гравітаційних перешкод, за винятком впливу Сонця та Місяця, вважається настільки малою порівняно з рівнодіючою інерційних сил, що ним можна знехтувати [21–23]. Саме виключення впливу інерційних сил на результати вимірювання гравіметра є на даний момент часу одними з основних труднощів на шляху підвищення точності визначення ПСТ.

Шлях, що пройшла пробна маса, вимірюється відносно інерційної системи координат, яка не є абсолютно інерційною. Тому кінематичні похибки можна розділити на дві групи:

– обумовлені впливом факторів, що діють на пробне тіло;

– обумовлені впливом факторів, що діють на інерційну систему відліку координат пробної маси.

Сукупність показників вказаних похибок дозволяє визначити структуру показників балістичного гравіметра (рис. 1).

Метрологічна задача при розробці, виготовленні та дослідженні гравіметрів зводиться до зменшення всіх складових похибки вимірювання. Так, похибки випадкового походження зменшують шляхом збільшення числа вимірювань N згідно з виразом $\sigma/\sqrt{N}$, якщо є підстава вважати, що $g = \text{const}$.

Проблема відтворення одиниць довжини та часу в абсолютній гравіметрії зводиться переважно до підвищення точності та тривало-часової стабільності їх відтворення, бо саме похибки цих одиниць [25–28] є основною перешкодою у підвищенні точності вимірювання ПСТ.

Відтворення одиниці довжини в сучасних балістичних гравіметрах високої точності здійснюються шляхом стабілізації частоти випромінювання робочого лазера по гетеродину, що має у своєму складі осередок резонансного поглинання на парах йоду. Така будова джерела випромінювання обумовлена високими вимогами до тривало-часової стабільності довжини хвилі $\sim 5 \cdot 10^{-9}$. Задовольнити ці вимоги без йодових лазерів неможливо. У той же час, їх вихідна потужність недостатня для інтерферометра, що вимірює шлях, пройдений пробним тілом. Внаслідок цього виникає необхідність створення систем стабілізації з гетеродуванням. Проте, як показує досвід, для надійної роботи цих систем в умовах мікросейсмічності їх необхідно доповнювати пристроями періодичного підтвердження вірності вибору номера лінії поглинання.

Існують й інші схеми прив'язки робочого лазера до гетеродинного. Це – робота йодового лазера у режимі широко-полосного сканування. Шири-

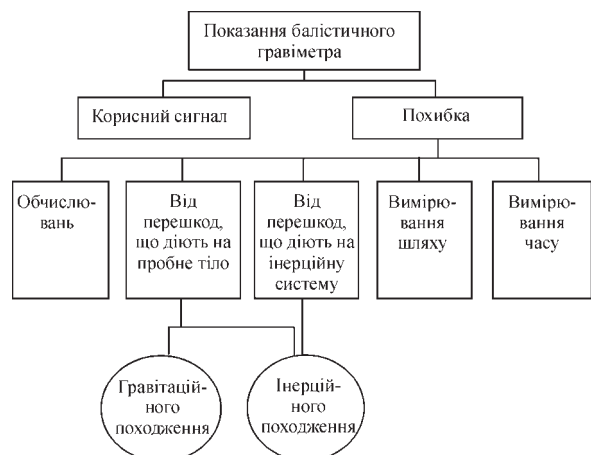


Рис. 1. Структура показників балістичного гравіметра

на смуги сканування вибирається так, щоб за один період частота генерації, як мінімум, хоча б один раз проходила через значення необхідної лінії спостереження. Робочий лазер вважається налагодженим, якщо сигнали нульових биттів, обох ОКГ (оптичних квантових генераторів) з'являються в момент проходження гетеродином лінії поглинання. У випадку запізнення або випередження сигналу биття виділяється сигнал помилки, що корегує частоту робочого лазера [29]. Така схема дає високу надійність відтворення довжини хвилі.

Значні помилки при вимірюванні ПСТ з'являються в тому випадку, якщо лазер генерує більше однієї моди, що спотворює характеристики стабілізуючого механізму. Цей ефект ліквідується шляхом регулювання струму розряду в трубці або за допомогою інших спеціальних заходів. Так, наприклад, застосовується стабілізація лазера за провалом Лемба, причому в даному випадку нестабільність довжини хвилі також залежить від системи автоналагодження. У [2, 3] пропонується метод відтворення одиниці довжини хвилі шляхом повільного сканування довжини резонатора лазера за синусоїдальним законом з амплітудою ± 5 мкм і частотою 0,01 Гц, що забезпечує усереднення мод за 100 с. Слід зазначити, що метод відтворення одиниці довжини за допомогою лазера є, на даний час, найкращим, але не єдиним. Так, закордоном приділяють увагу вдосконаленню гравіметрів, в яких довжина задається за допомогою еталона Фабрі-Перро, а початок і кінець відліку часу здійснюється за моментами появи інтерференції пучків квазі-білого світла («ксенонова лампа») [2]. Проте довжину еталона Фабрі-Перро слід періодично контролювати за допомогою лазера, що стабілізований по йоду, а для збереження стабільності довжини еталона необхідно підтримувати температуру в термостаті з точністю до 0,01 К. Таким чином, досягнення тривало-часової стабільності одиниці довжини (10^{-9}) є великою проблемою, хоча саме за допомогою гравіметра з еталоном Фабрі-Перро та джерелом білого світла отримано найвищу точність вимірювання ПСТ, що складає 10^{-9} .

Явища, що викликають систематичні похибки

Фактори впливу	Фізичні явища	Оцінка кількісного впливу, мкГал	Невиключений залишок, мкГал	Висновки
Гравітаційні	Притягання Сонця та Місяця	10^{-1}	10^{-2}	Не впливає
	Притягання апаратури	—	$5 \cdot 10^{-4}$	Не впливає
	Гравітаційний градієнт	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	Не впливає
	Вплив локальних змін мас атмосфери	$\pm 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	Не впливає
	Вплив мас ґрунтових вод	$\pm 2 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}	Не впливає
Інерційні	Електростатичні та магнітні сили	—	$8 \cdot 10^{-3}$	Враховано
	Градієнт магнітного поля	—	$5 \cdot 10^{-4}$	Не впливає
	Опір залишкового газу	—	$7 \cdot 10^{-3}$	Враховано
	Вплив обертання Землі	—	$5 \cdot 10^{-4}$	Враховано
Інструментальні при визначенні шляху	Нестабільність довжини хвилі лазера	$\pm 3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	Враховано
	Нестабільність температури	—	10^{-3}	Враховано
	Обертання пробного тіла навколо горизонтальної осі	—	$4 \cdot 10^{-3}$	Враховано
	Нестабільність тиску	—	10^{-3}	Враховано
	Відхилення від вертикалі	—	10^{-3}	Враховано
Інструментальні при визначенні часу	Нестабільність генератора	—	$5 \cdot 10^{-4}$	Враховано
	Неточність вимірювання інтервалів часу	$\pm 5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$	Враховано
	Кінцева швидкість світла	25	—	Враховано

Інтервали часу руху пробного тіла вимірюються шляхом підрахунків імпульсів відомої частоти, що проходять через селектор, з плином інтервалу часу T_n . Проте саме таким вимірюванням притаманні похибки, що обумовлені неідентичністю затримок відкриття та закриття селектора, кінцевою дією імпульсів, небездоганністю їх фронтів тощо. Кількісний сумарний вплив вказаних факторів зручно представити деяким еквівалентним розширенням інтервалу часу T_n . Похибку вимірювання прискорення, що викликана помилками вимірювання двох інтервалів часу T і T_n , представлено у вигляді:

$$\Delta g \approx 10^{-9} \cdot g \cdot \sqrt{(\alpha_1^2 \cdot \Delta T^2 + \alpha_2^2 \cdot \Delta T_n^2)}, \quad (6)$$

де α_1 і α_2 – відомі та сталі коефіцієнти; ΔT і ΔT_n – похибки вимірювання інтервалів часу T і T_n .

Якщо, наприклад, $\Delta T = 5$ нс, а $\Delta T_n = 10$ нс, то $\Delta g = 0,25$ мГал. Згідно з іншими джерелами, не виключена частина систематичної похибки гравіметра, обумовлена його чутливістю до розширень інтервалу часу T_n , що складає 0,6...1 мкГал. Деякі фізичні явища, що викликають систематичні похибки, наведені в таблиці.

Основні обмеження точності балістичних методів визначення ПСТ. Подальшому росту точності перешкоджає цілий ряд обставин як принципового (фізичного), так і технологічного (економічного) характеру. Тому виникає питання про оптимальну точність, яка залежить від багатьох факторів і визначається обмеженнями. Ці обмеження необхідно знати, щоб, з однієї сторони, використовувати усі точні можливості, що надає теорія, а з іншої – не вдаватися до марних спроб підвищити точність за межі можливого.

Проаналізуємо, яким чином практичні міркування формують умови необхідної точності вимірювань у гравіметрії. Нехай маємо повільний (квазістатичний) процес, що протікає. Необхідно із заданою надійністю β отримати величину $\Delta S(t)$ (рис. 2) вимірювання процесу $S(t)$ за час t .

Як відомо, величина, що вимірюється, та похибка $\delta(t)$ БЛГ повинні бути пов'язані співвідношенням:

$$\Delta S(t) \geq \beta \cdot \delta(t), \quad (7)$$

де $\beta \geq 1$ – число, що характеризує надійність вимірювання.

Тоді теорему Лагранжа про середнє значення на інтервалі, що розглядається, можна записати у наступному вигляді:

$$\frac{S(t_2) - S(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta S(t)}{\tau} = \frac{dS}{dt} = V(t),$$

звідки з урахуванням рівняння (7) одержимо:

$$\delta(t) \leq \tau \cdot \frac{V(t)}{\beta}. \quad (8)$$

Із рівняння (8) випливає, що у випадку вимірювань процесів, що повільно змінюються, крім тривіального до точності засобу вимірювання приєднуються також і не зовсім очевидні вимоги (тривіальність вимірювання – у тому, що похибка приладу $\delta(t)$ повинна бути тим менша, чим з більшою надійністю потрібно отримати результат):

- значення похибки приладу повинно змінюватися з часом, якщо швидкість процесу $V(t)$ змінна;
- значення похибки приладу повинно бути тим менше, чим менший проміжок часу τ , що витрачається на вияв змін ΔS .

На основі рівняння (8) визначимо максимальне допустиме значення $\delta(t)$. Якщо $\tau = 0,1$; $\beta = 1$; $V = 1$ мкГал, то:

$$\delta = \frac{0,1 \cdot 1}{1} = 0,1 \text{ мкГал або у відносному виразі } \delta/g_0 = 0,1 \cdot 10^{-10}.$$

Така похибка вимірювання ПСТ потрібна на даний час для вирішення деяких геологічних задач. Приблизно той же порядок точності необхідний зразковим гравіметрам для перевірки робочих засобів вимірювання прискорення. Але ця точність на даний момент часу знаходиться поблизу тих меж, які визнаються деякими інструментальними та принциповими обмеженнями.

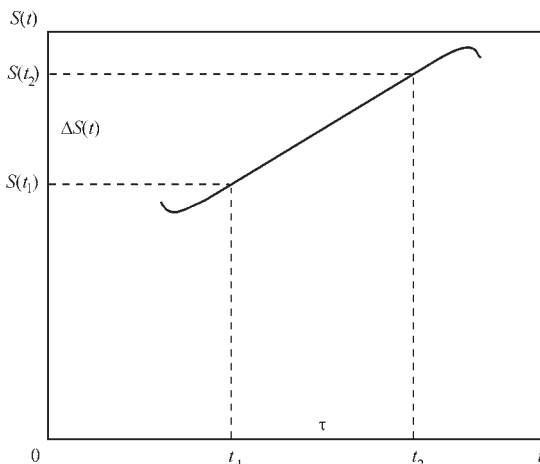


Рис. 2. Залежність допустимої похибки від швидкості дрейфу процесу вимірювання: $S(t)$ – зміна параметра процесу, що вивчається, за час спостереження τ

Як вже зазначалось раніше, похибка лазерного інтерферометра, що є пристроєм для відтворення одиниці довжини, чинить суттєвий вплив на похибку гравіметра. Визначимо одну із похибок інтерферометра – дифракційну похибку, що обумовлена обмеженою апертурою світлового пучка:

$$\Delta g/g \gg 0,1 (\lambda/d)^2.$$

При довжині хвилі (так як і в нашому випадку) $\lambda = 0,633$ мкм; діаметрі пучка $d \approx 2$ мм: $\Delta g/g = 0,1 \cdot (0,633 \cdot 10^{-6}/2 \cdot 10^{-3})^2 \approx 1,0017225 \cdot 10^{-8}$.

При проведенні гравіметричних вимірювань вищої точності враховується цілий ряд систематичних похибок шляхом внесення відповідних поправок, таких як поправки за тиском світла, вертикальні та горизонтальні градієнти першого та другого порядку, опір вакууму та інші. Хоча в даний час точне врахування цих похибок та внесення поправок є справою складнішою, ніж саме вимірювання прискорення, проте воно принципово здійснено. Але все ж таки є обмеження фундаментального характеру, які неможливо усунути ніякими інструментальними та технологічними засобами. До них відносяться наближеність встановленої величини швидкості світла, квантово-механічні обмеження, межі точності визначення градієнтів прискорення, флуктуації тощо.

Розглянемо обмеження, що накладають квантово-механічні закони, використовуючи відношення невизначеностей:

$$(\Delta E)^2 \cdot (\Delta t)^2 \geq h^2. \quad (9)$$

Ця нерівність накладає обмеження на вимірювання енергії (швидкості) тіла, якщо її необхідно виміряти в точно заданий момент часу. Як вже зазначалось вище, прискорення g можна визначити з відношення:

$$g = \frac{V - V_0}{t - t_0}.$$

Знайдемо дисперсію ПСТ:

$$D = M_2\{g\} = \frac{g^2}{(t - t_0)^2} \cdot [(\Delta t)^2 + (\Delta t_0)^2] + \frac{1}{(t - t_0)^2} \cdot [(\Delta V)^2 + (\Delta V_0)^2], \quad (10)$$

де $(\Delta t)^2$ і $(\Delta t_0)^2$ – дисперсії (невизначеності) кінцевого та початкового моментів часу; $(\Delta V)^2$ і $(\Delta V_0)^2$ – дисперсії кінцевої та початкової швидкостей вільно падаючого тіла.

Тоді рівняння (10), використовуючи рівняння (9), має вигляд:

$$D = \frac{g^2}{(t - t_0)^2} \cdot [(\Delta t)^2 + (\Delta t_0)^2] + \frac{h^2}{m^2 \cdot (t - t_0)^2} \times \left[\frac{1}{V^2 \cdot (\Delta t)^2} + \frac{1}{V_0^2 \cdot (\Delta t_0)^2} \right]. \quad (11)$$

Досліджуючи рівняння (11) на екстремум, визначимо $(\Delta \bar{t})^2$ і $(\Delta \bar{t}_0)^2$, які відповідають мінімуму D . Опускаючи проміжні викладки, маємо:

$$(\Delta \bar{t})^2 = h / (m \cdot V \cdot g) \text{ та } (\Delta \bar{t}_0)^2 = h / (m \cdot V_0 \cdot g).$$

Визначено, що вимірювання ПСТ точніше ніж 10^{-9} принципово неможливо внаслідок квантово-механічних обмежень, а також – флуктуацій мір довжини та часу.

Висновки

Проведено розрахунок та аналіз основних похибок балістичного лазерного гравіметра. Встановлено, що точність визначення ПСТ залежить від точності вимірювання наступних величин: шляху S пробного тіла; ступеня фіксації інерційної системи, відносно якої вимірюють шлях S (тобто від точності S_0 і V_0); часу t ; гравітаційних сил, що складають множину $F_i^{(r)}$; інерційних сил, що складають множину $F_i^{(i)}$.

Визначено, що вимірювання ПСТ точніше ніж 10^{-9} принципово неможливо внаслідок квантово-механічних обмежень, а також – флуктуацій мір довжини та часу.

Список літератури

1. Безвесільна О.М., Подчашинський Ю.О., Остапчук А.А. (2010) *Балістичний гравіметр*. Патент України на винахід 98058, МПК G 01 V 7/00, № 2010 16009 від 31.12.2010. Бюл. № 7.
2. Безвесільна О.М., Остапчук А.А., Ткаченко С.С. (2010) *Гравіметри та їх виставка*. Монографія. Житомир, ЖДТУ.
3. Безвесільна О.М., Остапчук А.А., Тимчик Г.С. (2014) *Автоматичний лазерний балістичний гравіметр*. Житомир, ЖДТУ.
4. Безвесільна О.М., Тимчик Г.С. (2018) *Наукові дослідження у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій*. Підручник з грифом ЖДТУ. Київ, Науково-виробниче об'єднання «Пріоритети».
5. Безвесільна О.М., Подчашинський Ю.О., Тимчик Г.С. (2011) *Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин*. Житомир, ЖДТУ.
6. Bezvesilna, O.M., Tolochko, T.O., Hrynevych, M.S. (2013) *Aviation gravimetric system with two-channel transformer gravimeter «Erbe der europäischen Wissenschaft/Heritage of European science 2023»*, series of monographs «European Science», Karlsruhe, Germany.
7. Bezvesilnaya, E.N., Kyrychuk, Y.N., Hrynevych, M.S., Tolochko, T.A. (2023) Simulation of the influence of parameters of disturbing vibration accelerations on the operation of a new two-channel transformer gravimeter. *Bulletin of the karaganda university Physics, series Web of Science*, 112(4), 23–35. DOI: <https://doi.org/10.31489/2023ph4/23-37>
8. Ткачук А.Г., Безвесільна О.М., Добржанський О.О. та ін. (2022) Налаштування польотного контролера та системи стабілізації безпілотного літального апарата із системою моніторингу наявності пожеж та витоків теплової енергії на борту. *Державний університет «Житомирська політехніка», Технічна інженерія*, 2(90), 59–69. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-59-69](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-59-69)
9. Болух В.Ф., Данько В.Г. (2006) *Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії*. Харків, НТУ «ХПІ».
10. Болух В.Ф., Коритченко К.В. (2009) Основні напрямки розвитку електромеханічних імпульсних прискорювачів. *Електротехніка і електромеханіка*, 4, 7–13.
11. McNab, I.R. (2003) Launch to space with an electromagnetic railgun. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39(1), 295–304. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2002.805923>
12. Yamori, A., Ono, Y., Kubo, H. (2001) Development of an induction type railgun. *IEEE Transactions on Magnetics*, 37(1), 470–472. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.911879>

13. Balicki, A., Zabar, Z., Birenbaum, L. (2005) Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(1), 171–175. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.839283>
14. Болух В.Ф., Щукин І.С. (2010) Схемно-конструктивные совершенствования ударных электромеханических преобразователей индукционного типа. *Електротехніка і електромеханіка*, 5, 5–11.
15. Болух В.Ф., Рассоха М.А. (2010) Влияние наружного электромагнитного экрана на эффективность ударного электромеханического преобразователя дисковой конфигурации. *Електротехніка*, 10, 31–38.
16. Світлов С.М. (2000) *Методи аналізу та зменшення динамічних похибок балістичних гравіметрів*. Автореферат дис. канд. тех. наук 05.11.15. Харків, Харк. держ. НДІ метрології.
17. Болух В.Ф., Вінніченко О.І. (2019) *Балістичний гравіметр для симетричного та несиметричного способів вимірювань прискорення вільного падіння*. Пат. на винахід 118620 Україна, МПК G01V 7/14 (2006.01). № а 2017 06239; заяв. 19.06.2017; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3.
18. (2003) *Метрологія та вимірювальна техніка. Підручник*. Поліщук Е.С. (ред.). Львів, Бескид Біт.
19. Занимонський Є.М. (2008) *Відтворення тривалості хвилі лазера у транспортальному балістичному гравіметрі*. У: Тези доповідей «І ВІТК. Харків, Метрологія в гравіметрії», сс. 69–71.
20. Болух В.Ф., Вінніченко О.І., Омельченко А.В., Несежмаков П.І. (2021) *Балістичний гравіметр для симетричного способу вимірювання прискорення вільного падіння з індукційно-динамічною катапультою, що має багатоімпульсне збудження*. Патент на винахід UA №124795 C2 від 18.11.2021, заявл. 09.04.2020, опубл. 18.11.2021.
21. Jiang, Z., Francis, O., Vitushkin, L. et al. (2011) Final report on the seventh international comparison of absolute gravimeters (ICAG 2005). *Metrologia*, 48, 246–260. DOI: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/5/003>
22. Болух В.Ф., Вінніченко О.І. (2011) Удосконалення кінематичної схеми балістичного гравіметра за рахунок лінійного електромеханічного перетворювача. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2/7(50), 9–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2011.1817>
23. Кухарчук В.В., Володарський Є.Т., Кучерук В.Ю., Грабко В.В. (2012) *Основи метрології та електричних вимірювань*. Підручник. Вінниця, ВНТУ.
24. Самооткін Б.Б. (2001) *Лекції з теорії автоматичного керування*. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Житомир, ЖІТІ.
25. Сидоренко Г.С., Мірошніченко О.М., Омельченко А.В. та ін. (2009) *Цифровий гравіметр для абсолютних вимірів прискорення сили ваги*. Пат. 80060 C2 Україна, МПК (2009) G01V 7/00, № 80060, заяв. 08.10.07, опубл. 10.09.09, Бюл. № 17.2009 р.
26. Сидоренко Г.С., Мірошніченко О.М., Омельченко А.В., Заяц І.М. (2009) *Гравігеодезичний спосіб атестації гравіметричних пунктів та пристрій для його здійснення*. Пат. 88061 C2 Україна, МПК (2009) G01V 7/00, № 88061, заяв. 08.10.07, опубл. 10.09.09, Бюл. № 17.2009 р.
27. Короткий Ю.О., Дашків В.М. (2010) *Пробне тіло для абсолютного балістичного гравіметра*. Пат. 92651 C2 Україна, МПК (2009) G01V 7/00, № 92651, заяв. 09.02.09, опубл. 25.11.10, Бюл. № 22.2010 р.
28. Ткаченко С.С., Киричук Ю.В., Остапчук А.А., Подчашинський Ю.О. (2010) Гравіметрична система з високоточним виставленням осі чутливості гравіметра. Пат. 90627 C2 Україна, МПК (2009) G01V 7/00, № 90627, заявл. 21.04.09, опубл. 11.05.10, Бюл. № 9.2010 р.
29. Подчашинський Ю.А., Ткаченко С.С., Остапчук А.А. та ін. (2010) Спосіб виставлення осей чутливості акселерометрів. Пат. 91315 C2 Україна, МПК (2009) G01B 11/26, G01P 21/00, № 91315, заяв. 06.11.09, опубл. 12.07.10, Бюл. № 13.2010 р.

References

1. Bezvesilna, O.M., Podchashynskyi, Yu.O., Ostapchuk, A.A. (2010) *Ballistic gravimeter*. Patent UA, 98058 Int. Cl. IPC G 01 V 7/00 u 2010 16009, 31.12.2010 [in Ukrainian].
2. Bezvesilna, O.M., Ostapchuk, A.A., Tkachenko, S.S. (2010) *Gravimeters and their exhibition*: Monography. Zhytomyr, ZSTU [in Ukrainian].
3. Bezvesilna, O.M., Ostapchuk, A.A., Tymchyk, G.S. (2014) *Automated laser ballistic gravimeter*. Zhytomyr, ZSTU [in Ukrainian].

4. Bezvesilna, O.M., Tymchyk, H.S. (2018) *Scientific research in the field of automation and computer-integrated technologies. Information and computerized systems in the AUP*: Textbook, ZSTU. NGO Priorities, Kyiv [in Ukrainian].
5. Bezvesilna, O.M., Podchashynskyi, Yu.O., Tymchyk, G.S. (2011) *Scientific research in the field of measurement of mechanical quantities*. Zhytomyr, ZSTU [in Ukrainian].
6. Bezvesilna, O.M., Tolochko, T.O., Hrynevych, M.S. (2013) *Aviation gravimetric system with two-channel transformer gravimeter «Erbe der europäischen Wissenschaft / Heritage of European science 2023»*, Series of Monographs European Sci., Karlsruhe, Germany.
7. Bezvesilnaya, E.N., Kyrychuk, Y.N., Hrynevych, M.S., Tolochko, T.A. (2023) Simulation of the influence of parameters of disturbing vibration accelerations on the operation of a new two-channel transformer gravimeter. *Bulletin of the Karaganda* 35. DOI: <https://doi.org/10.31489/2023ph4/23-37>
8. Tkachuk, A.G., Bezvesilna, E.N., Dobrzhanskyi, O.O. et al. (2022) Setting up a flight controller and stabilization system for an unmanned aerial vehicle with a system for monitoring the presence of fires and thermal energy leaks on board. *ZSTU, Tekhnichna Inzheneriya*, 2(90), 59–69 [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-59-69](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-59-69)
9. Bolyukh, V.F., Danko, V.G. (2006) *Linear electromechanical converters of pulse action*. Kharkiv, NTU KhPI [in Ukrainian].
10. Bolyukh, V.F., Korytchenko, K.V. (2009) Main directions of development of electromechanical pulse accelerators. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 4, 7–13 [in Ukrainian].
11. McNab, I.R. (2003) Launch to space with an electromagnetic railgun. *IEEE Transact. on Magnetism*, 39(1), 295–304. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2002.805923>
12. Yamori, A., Ono, Y., Kubo, H. (2001) Development of an induction type railgun. *IEEE Transact. on Magnetism*, 37(1), 470–472. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.911879>
13. Balicki, A., Zabar, Z., Birenbaum, L. (2005) Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transact. on Magnetism*, 41(1), 171–175. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.839283>
14. Bolyukh, V.F., Shchukin, I.S. (2010) Schematic and constructive improvements of shock electromechanical transformers of the induction type. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 5, 5–11 [in Russian].
15. Bolyukh, V.F., Rassokha, M.A. (2010) The influence of the external electromagnetic shield on the effectiveness of the shock electromechanical converter disk configuration. *Elektrotehnika*, 10, 31–38 [in Russian].
16. Svitlov, S.M. (2000) *Methods of analysis and reduction of dynamic errors of ballistic gravimeters*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Kharkiv, State Research Institute of Metrology, Kharkiv [in Ukrainian].
17. Bolyukh, V.F., Vinnichenko, O.I. (2019) *Ballistic gravimeter for symmetric and asymmetric methods of measuring the acceleration of free fall*. Patent 118620 UA, Int. Cl. G01V 7/14, fill. 19.06.2017; publ. 11.02.2019 [in Ukrainian].
18. (2003) *Metrology and measuring technology: Textbook*. Ed. by E.S. Polishchuk. Lviv, Beskyd Bit. [in Ukrainian].
19. Zanimonskyi, E.M. (2008) *Long-wave laser reproduction in a transportable ballistic gravimeter*. In: Abstr. of Papers. Kharkiv, Metrology in gravimetry, 69–71 [in Ukrainian].
20. Bolyukh, V.F., Vinnichenko, O.I., Omelchenko, A.V., Neezhmakov, P.I. (2021) *Ballistic gravimeter for a symmetric method of measuring the acceleration of free fall with an induction-dynamic catapult having multipulse excitation*. Patent 124795 UA, fill. 04.09.2020, publ. 11.18.2021 [in Ukrainian].
21. Jiang, Z., Francis, O., Vitushkin, L. et al. (2011) Final report on the seventh international comparison of absolute gravimeters (ICAG 2005). *Metrologia*, 48, 246–260. DOI: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/5/003>
22. Bolyukh, V.F., Vinnichenko, O.I. (2011) Improvement of the ballistic gravimeter kinematic scheme at the expense of the linear electromechanical converter. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, 2/7(50), 9–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2011.1817> [in Ukrainian].
23. Kukharchuk, V.V., Volodarsky, E.T., Kucheruk, V.Yu., Grabko, V.V. (2012) *Fundamentals of metrology and electrical measurements*. Vinnytsia, VNTU [in Ukrainian].
24. Samotokin, B.B. (2001) *Lectures on the theory of automatic control: Manual for students of higher educational institutions*. Zhytomyr, ZHYTI [in Ukrainian].
25. Sydorenko, G.S., Miroshnychenko, O.M., Omelchenko, A.V. et al. (2009) *Digital gravimeter for absolute measurements of the acceleration of gravity*. Pat. 80060 UA, Int. Cl. G01V 7/00, 80060, fill. 08.10.07, publ. 10.09.09 [in Ukrainian].
26. Sydorenko, G.S., Miroshnychenko, O.M., Omelchenko, A.V., Zayats, I.M. (2009) *Gravimetric points and device for its implementation*. Pat. 88061 UA, Int. Cl. G01V 7/00, 88061, fill. 08.10.07, publ. 10.09.09 [in Ukrainian].
27. Korotkyi, Yu.O., Dashkev, V.M. (2010) *Test body for an absolute ballistic gravimeter*. Pat. 92651 UA, Int. Cl. G01V 7/00, 92651, fill. 09.02.09, publ. 25.11.10 [in Ukrainian].
28. Tkachenko, S.S., Kyrychuk, Yu.V., Ostapchuk, A.A., Podchashynskyi, Yu.O. (2010) *Gravimetric system with high-precision setting of the sensitivity axis of the gravimeter*. Pat. 90627 UA, Int. Cl. G01V 7/00, 90627, fill. 21.04.09, publ. 11.05.10 [in Ukrainian].
29. Podchashynskyi, Yu.A., Tkachenko, S.S., Ostapchuk, A.A., Kondratyuk, Zh.M., Kyrychuk, Yu.V. (2010) *The method of setting the sensitivity axes of accelerometers*. Pat. 91315 UA, Int. Cl. G01B 11/26, G01P 21/00, 91315, fill. 06.11.09, publ. 12.07.10 [in Ukrainian].

MAIN ERRORS OF THE BALLISTIC GRAVIMETER

O.M. Bezvesilna, T.O. Tolochko, J.V. Trokhymchuk

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

E-mail: prilad168t@gmail.com; asnk@kpi.ua

It was established that there is currently no information on the calculation and assessment of the main errors of ballistic laser gravimeters and recommendations for their reduction. Therefore, the purpose of this work is calculation and analysis of the main errors of the ballistic laser gravimeter. The test mass during the period of free fall is in interaction with all physical objects of the universe, which with the help of gravitational and other forces affect the law of motion of the test body. Eliminating the influence of inertial forces on the results of the gravimeter measurement is currently one of the main difficulties in improving the accuracy of determining the acceleration of gravity (AG). The path traveled by the test mass is measured relative to the inertial coordinate system, which is not absolutely inertial. Therefore, kinematic errors can be divided into two groups: those due to the influence of factors acting on the test body, and those acting on the inertial reference system of the test mass coordinates. The totality of indices of the specified errors allows determination of the structure of the indices of the ballistic gravimeter accuracy. The problem of reproducing the units of length and time in absolute gravimetry is mainly reduced to increasing the accuracy and long-term stability of their reproduction, since it is the errors of these units that are the main obstacle to increased accuracy of AG measurements. It was established that the accuracy of AG determination depends on the accuracy of measurement of the following quantities: the path of the test body; the degree of fixation of the inertial system relative to which the path is measured; time; gravitational forces; and inertial forces. It was determined that measuring the acceleration of gravity more precisely than 10^{-9} is fundamentally impossible due to quantum mechanical limitations, as well as fluctuations in length and time measures. 29 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

Keywords: acceleration of gravity, ballistic laser gravimeter, errors, test body

Отримано 11.11.2024

Отримано у переглянутому вигляді 23.11.202

Прийнято 20.12.2024