

УДК 621.317

**А. А. Остапчук, к.т.н., доцент**  
Житомирський державний технологічний університет  
вул. Черняхівського, буд. 103, м. Житомир, 10003, Україна  
[ost\\_ann@mail.ru](mailto:ost_ann@mail.ru)

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ТЯЖІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ БАЛІСТИЧНОГО ГРАВІМЕТРА

*Стаття присвячена огляду наявних можливостей вимірювання прискорення сили тяжіння за допомогою балістичних гравіметрів, вдосконалення системи автоматизації обробки інформації та можливості подальшого створення системи відеоспостереження за процесом отримання результатів, що повинно усунути похибки та забезпечити максимальну точність вимірювання.*

**Ключові слова:** прискорення сили тяжіння, балістичний гравіметр, автоматизація вимірювання, точність вимірювання, математична модель, інструментальна похибка.

**Вступ.** Проведені дослідження в галузі вимірювання прискорення сили тяжіння показали, що балістичний метод полягає у вимірюванні довжини шляху, що пройшло вільно падаюче тіло, яке почало свій рух з нульової початкової швидкості за певний проміжок часу. На основі залежності довжини шляху від часу визначається прискорення вільного падіння.

Створення досконалих вимірювачів переміщень для балістичних гравіметрів стало можливим після винаходу лазерів, які володіють високою монохроматичністю та когерентністю.

Широке впровадження у вимірювальну техніку лазерів та фотоелектричних перетворювачів, які модулюють світловий потік в електричні сигнали, дозволило створити в нашій країні та за кордоном цілий ряд конструкцій лазерних вимірювачів переміщень, основними перевагами яких є:

- підвищення точності вимірювань;
- скорочення часу вимірювань;
- автоматизація вимірювального процесу;
- зниження рівня підготовки обслуговуючого персоналу.

У статті досліджено можливості підвищення характеристик точності гравіметричної апаратури, побудованої на основі лазерів та фотоелектричних перетворювачів, розраховано математичні моделі балістичних гравіметрів та розглянуто можливість побудови функціональних схем основних модулів автоматизованої системи гравіметричних вимірювань.

**Постановка проблеми.** Вимірювання абсолютного значення прискорення сили тя-

жіння ( $g$ ) з високою точністю є базовим елементом успішного розв'язання широкого спектра наукових задач: визначення форми Землі, побудова моделей руху глибинних мас, оцінка пружних деформацій поверхні планети, передбачення землетрусів, побудова моделей глибинних щільнісних неоднорідностей, пошук покладів корисних копалин, використання величини  $g$  як основи для визначення інших фізичних величин. Апаратним забезпеченням для вирішення цих наукових задач є гравіметричні прилади [1].

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

Дані про сучасні розробки таких систем свідчать про те, що вітчизняні прилади нині поступаються за своїми технічними характеристиками (за кінцевою точністю результатів вимірювань та іншими метрологічними параметрами) зарубіжним розробкам. Крім того, в даний час в Україні проводиться програма оновлення гравіметричного обладнання опорних пунктів національної геодезичної мережі [2, 3].

Нині значного поширення набувають комерційні варіанти конструкції гравіметрів. Комерційні гравіметри пристосовуються до умов роботи у важких кліматичних умовах: підвищена вологість, високі температури навколишнього середовища, шуми місцевого

транспорту, інші шуми міста (будівельні майданчики, промислові шуми та ін.). Точність таких гравіметрів звичайно менша, це дозволяє знизити їх ціну. Великі промислові групи, як правило, закупають гравіметри для проведення власних науково-дослідницьких робіт в галузі геологорозвідки: пошуки покладів нафти, газу, інших корисних копалин. До таких приладів висувають певні вимоги: компактність, універсальність у застосуванні, зручність та простота обслуговування, ремонтпридатність, тривалий наробіток на відмову, уніфікованість вузлів поєднання з іншою апаратурою, спроможність працювати у важких умовах навколишнього середовища, достатня точність, доступна ціна.

**Мета роботи.** Підвищення точності вимірювання прискорення сили тяжіння шляхом дослідження абсолютного гравіметричного приладу та розробки на основі наукового пошуку автоматизованої системи вимірювань значень прискорення сили тяжіння.

**Основна частина.** Принцип дії гравіметра полягає в балістичному методі вимірювання абсолютного значення прискорення сили тяжіння (ПСТ)  $g$ , яке визначається за результатами вимірювання шляху та часу вільного падіння оптичного кутового відбивача. Вимірювання шляху, пройденого падаючим тілом, здійснюється лазерним інтерферометром, а мірою інтервалів часу є сигнали прецизійного (наприклад, рубідієвого) стандарту частоти [4].

Визначення абсолютного значення прискорення сили ваги виконується гравіметрами з похибкою 5-6 мкГал, яка включає як інструментальну похибку, так і вплив зовнішніх умов вимірювання.

Балістичний гравіметр, що застосовується, повинен мати практично необмежений діапазон вимірювань, нестабільність довжини хвилі випромінювання робочого лазера за час спостереження не повинна перевищувати  $5 \cdot 10^{-9}$ , відносна похибка стандарту частоти має бути не більшою  $5 \cdot 10^{-10}$ , тиск залишкового газу в балістичній камері не повинен перевищувати  $5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. стовпчика.

На основі вивчення сучасної патентної інформації та науково-технічних джерел встановлено, що в розвитку балістичних гравіметричних приладів чітко визначилися такі два напрями балістичного методу: "Free-fall" і "Rise&fall" (несиметричний та симетричний).

Аналіз конструктивних елементів приладу свідчить про недосконалість будови та складність вирішення технічних проблем, пов'язаних з підвищенням точності вимірювань за допомогою абсолютного балістичного гравіметра. У вступній частині представлено перелік сфер, що потребують дані на основі точних гравіметричних вимірювань. На сьогоднішній день не існує конструктивної схеми балістичного вимірювального приладу, який вимірює прискорення сили тяжіння з високою точністю, що підтверджує актуальність визначених нами завдань.

Набір технічних методів та засобів вимірювання шляху і часу є дуже різноманітним, проте, незважаючи на це, можна описати структуру сучасного балістичного абсолютного гравіметра.

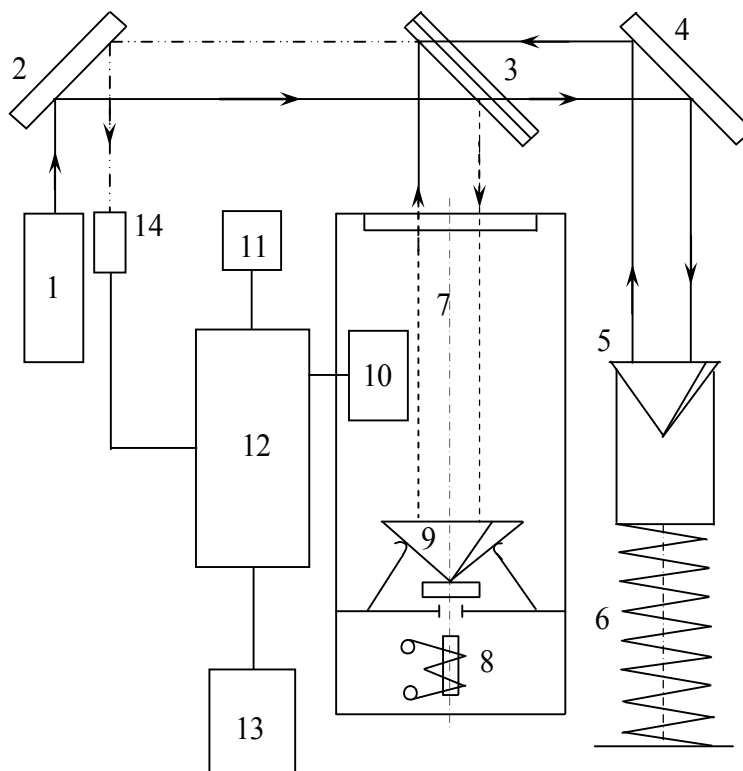
У склад гравіметра входять:

- інтерферометр, який призначений для перетворення часово-просторових параметрів руху пробного тіла в електричний сигнал;
- вимірювач шляху та часу;
- балістичний блок, в якому реалізується вільний рух пробного тіла;
- прилад урахування або компенсації зовнішніх інерційних перешкод;
- прилад автоматизації і управління роботою гравіметра;
- система оперативного контролю працездатності й індикація відмов;
- система контролю та підтримки вакууму;
- система горизонтування;
- обчислювальний пристрій;
- система документування;
- блок живлення.

Кожен із структурних елементів конструктивно оформлюється у вигляді окремого блоку. Структура гравіметра та конкретна реалізація його складових одиниць істотно залежать від алгоритму вимірювань, призначень і технічних вимог до приладу.

На рис. 1 подана спрощена схема одного із сучасних гравіметрів [5], що працюють за симетричним методом.

Головним недоліком балістичних гравіметрів є їх висока чутливість до великої кількості впливових факторів, що, в свою чергу, спричиняє конструктивну складність, великі габаритні розміри та вагу гравіметрів, а також їх периферійних приладів, складність обробки результатів, невисоку продуктивність вимірювань тощо.



**Рис. 1. Схема балістичного гравіметра:**

- 1 – лазер; 2, 3, 4 – дзеркала сейсмографа та інтерферометра;  
 5 – закріплені кутові відбивачі сейсмографа; 6 – довгоперіодичний сейсмограф;  
 7 – вакуумна камера; 8 – пусковий пристрій; 9 – пробне тіло; 10 – манометр;  
 11 – генерал міток часу; 12 – мікро-ЕОМ; 13 – цифродрук; 14 – фотоелектричний помножувач

Задача вимірювання сили ваги балістичними методами зводиться до вимірювання довжини та часу. Це впливає, наприклад, з аналізу розмірності прискорення [6]. Тому математична модель повинна виявити аналітичний зв'язок шляху, пройденого пробним тілом, з часом і зовнішніми гуртуючими впливами. Найбільш конструктивним буде такий підхід до побудови моделі, при якому, з одного боку, розглядається вільний рух пробного тіла в інерційній системі координат з урахуванням вертикального градієнта ПСТ та сил опору, а з другого – визначається закон руху деякої зв'язаної системи координат, яка зміщується під дією зовнішніх інерційних гуртувань і утримуючої відлікової системи гравіметра [7].

Розгляд вільного руху пробного тіла, підкинутого вертикально вгору в інерційній системі координат, зводиться до рішення нелінійного диференціального рівняння 2-го порядку такого вигляду:

$$m \cdot z'' = m \cdot (g_0 + \alpha \cdot z) - \gamma_1 \cdot z' - \gamma_2 \cdot (z')^2, \quad (1)$$

де  $m$  – маса пробного тіла;

$z$  – вертикальна координата;

$\alpha$  – вертикальний градієнт;

$\gamma_1, \gamma_2$  – коефіцієнти, які визначають внесок сил опору, відповідно пропорційних першій та другій степеням швидкості руху пробного тіла.

Розв'язання рівняння (1) методом послідовних наближень з використанням перетворень Лапласа і подальшим розкладом в ряд по степенях  $z$  приводить до такого рівняння:

$$z(t) = g_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot t^n, \quad (2)$$

де  $A_n$  – сукупність коефіцієнтів, які визначаються з умов руху пробного тіла в балістичному блоці відносно відлікової системи.

Цей вираз описує рух пробного тіла в інерційній системі координат. В умовах реального вимірювання ПСТ координата пробного тіла визначається в зв'язаній системі координат, що підлягає гуртуванням. Як відомо, координати пробного тіла в інерційній системі однозначно залежать від його координат в зв'язаній системі:

$$\bar{R}_i = \bar{r} + \bar{R}, \quad (3)$$

де  $\bar{R}_i$  – радіус-вектор пробного тіла в інерційній системі;

$\bar{r}$  – радіус-вектор пробного тіла в зв'язаній системі;

$\bar{R}$  – радіус-вектор, що описує зміщення зв'язкової системи.

Тому, як правило, робота з балістичним гравіметром здійснюється так, щоб вісь чутливості (в нашому випадку вісь  $z$ ) утримувалася вертикально, тоді рівняння (3) можна спростити:

$$S(t) = z(t) + R_z(t), \quad (4)$$

В цьому виразі компонента  $S(t)$  описує поведінку пробного тіла в інерційній системі, а компонента  $R_z(t)$  – вплив зовнішніх гуртуючих дій інерційної природи.

Алгоритми вимірювань ПСТ, що використовують описану модель, дуже різноманітні як за способом реалізації вільного руху пробної маси, так і за методами вимірювання шляху і часу.

Залежно від способу реалізації вільного руху усі методи можна розділити на дві групи:

- з несиметричним вільним рухом;
- з симетричним вільним рухом.

Ці методи відзначаються порівняно простою реалізацією вільного руху і відсутністю необхідності прикладення імпульсної (ударної) сили при запуску пробного тіла, яка залежить від висоти кидання, що значно покращує динамічні умови роботи гравіметра.

До переваг симетричних методів слід віднести можливість практично повного виключення систематичних похибок, що пропорційні першій степені швидкості руху пробного тіла, при порівняно простому алгоритмі вимірювання, а також можливість скорочення вертикальних розмірів приладу, оскільки при одній і тій же висоті гравіметра сумарний шлях, пройдений тілом, в даному випадку буде великим. Однак в момент кидка виникає імпульсна реактивна сила, що гуртує систему відліку і вносить похибку в результати вимірювань за допомогою симетричного методу.

Зважаючи на наявність невизначених коефіцієнтів  $A_n$  у виразі (2), він не дає можливості безпосередньо визначити ПСТ  $g_0$  за вимірними значеннями  $t$  та  $z(t)$ . Для цього необхідно провести вимірювання на декількох інтервалах спостереження:  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ . Тоді замість рівняння (2) одержимо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} z_0^* &= A_0 + A_1 \cdot t_0 + A_2 \cdot t_0^2 + \dots + A_n \cdot t_0^n \\ z_1^* &= A_0 + A_1 \cdot t_1 + A_2 \cdot t_1^2 + \dots + A_n \cdot t_1^n \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ z_i^* &= A_0 + A_1 \cdot t_i + A_2 \cdot t_i^2 + \dots + A_n \cdot t_i^n \\ z_N^* &= A_0 + A_1 \cdot t_N + A_2 \cdot t_N^2 + \dots + A_n \cdot t_N^n \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де  $z_i^* = z(t_i)/g_0$ .

Проводячи вимірювання на великій кількості інтервалів вільного руху, можна визначити таку кількість коефіцієнтів у рівнянні (2), яка необхідна для детального вивчення «тонкої структури» траєкторії польоту при дослідженні впливу різних факторів на закон руху пробного тіла, оскільки їх кількісний вплив визначається коефіцієнтами  $A_i$ :

$$A_0 = S_0/g_0,$$

де  $S_0$  – початкове положення пробного тіла;

$$A_1 = V_0/g_0,$$

де  $V_0$  – початкова швидкість пробного тіла;

$$A_2 = 0,5$$

$$A_3 = \alpha \cdot (S_0 + V_0 \cdot t/3 + g_0 \cdot t^2/12) / 2 \cdot g_0,$$

де  $\alpha$  – вертикальний градієнт і т. д.

Проведення вимірювань на великій кількості інтервалів до недавнього часу відбувалося зі значними технічними труднощами, у зв'язку з чим зазвичай обмежувалися 2...4 вимірювальними інтервалами, при цьому забезпечували такі умови експерименту, при яких коефіцієнти  $A_i$  старших порядків виявлялися знехтуваними (це й становить основу труднощів у сучасних точних гравітаційних вимірюваннях).

Завдяки розвитку мікроелектроніки і обчислювальної техніки в наш час практично всі закордонні балістичні гравіметри побудовані за схемою вимірювання великої кількості інтервалів шляху та часу.

Подібні розв'язання системи рівнянь (5) для різних часткових випадків можна знайти в різноманітній літературі [8, 9]. Так, симетричний спосіб буде відрізнятися від несиметричного лише значенням початкової швидкості, а багатостанційний від двостанційного – кількістю рівнянь. Варіюючи розмірами матриці коефіцієнтів системи рівнянь (5), можна одержати усі можливі сполучення умов вимірювань ПСТ за допомогою балістичного методу. Однак слід зазначити, що симетричний спосіб буде чітким лише при дотриманні повної симетрії інтервалів вимірювань.

Існують такі методи наближеного симетрування часу  $t$ :

- прямий пошук вершини траєкторії та симетрування часу;
- симетрування шляху, що пройшло пробне тіло, від початку інтервалу вимірювання до вершини траєкторії;
- симетрування по швидкості руху пробного тіла.

Найчастіше використовують другий та третій методи симетрування моментів вимірювання.

В подальшому планується розгляд систем автоматизації вимірювань балістичними гравіметрами та виведення і обробка отриманої інформації за допомогою розробки системи відеоспостереження.

Система автоматизації вимірювань абсолютним балістичним гравіметром повинна пройти такі можливі напрямки [10]:

- налагодження;
- підготовка до роботи;
- початкова ініціалізація системи;
- проведення вимірювань;
- збір даних про вимірюваний параметр;
- збереження даних про вимірюваний параметр;
- передача даних на обробку (зв'язок з ЕОМ);
- моніторинг стану системи в цілому та кожного пристрою окремо;
- створення інтерфейсу між гравіметром та цифровою ЕОМ;
- забезпечення найвищої можливої точності результатів вимірювання (головний напрям).

**Висновок.** Розглянуто найбільш важливі питання, що стосуються конструктивних і функціональних особливостей сучасного абсолютного лазерного балістичного гравіметра. Теоретичне дослідження проводиться на базі критичного аналізу сучасної вітчизняної і зарубіжної бази наукових даних. Дослідження практичних питань – шляхом аналізу даних експериментальних досліджень провідних у цій галузі вчених та самостійної розробки на їх основі функціональних схем модулів локальної системи вимірювань величини прискорення сили тяжіння та математичних моделей основних конструктивних частин абсолютного лазерного балістичного гравіметра, що передбачають обробку отриманих даних на ЕОМ.

Головним напрямом розробок є підвищення точності результатів вимірювання балістичними гравіметрами за рахунок удосконалення системи автоматизації обробки результатів та розробка системи відеоспостереження за процесом отримання інформації, що також має усунути похибки та забезпечити максимальну точність вимірювання.

### Список літератури

1. Юзефович А. П. Гравиметрия / А. П. Юзефович, Л. В. Огородова. – М. : Недра, 1980.
2. Tkachuk, A. N. Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter / А. Н. Tkachuk, E. N. Bezvesilnaya // Aviation. – 2014. – № 18. – P. 134–140, DOI:10.3846/16487788.2014.969878.
3. Tadano, S. Three dimensional gait analysis using wearable acceleration and gyro sensors based on quaternion calculations / Shigeru Tadano, Ryo Takeda, Hiroaki Miyagawa // Sensors. – 2013. – № 13. – P. 9321–9343, DOI: 10.3390/s130709321.
4. Грушко И. М. Основы научных исследований / И. М. Грушко, В. М. Сиденко. – Харьков : Вища школа, 1983. – 278 с.
5. Попов Е. И. Определение силы тяжести на подвижном основании / Е. И. Попов. – М. : Наука, 1987. – 218 с.
6. Dunzhu, X. The development of micro-machined gyroscope structure and circuitry technology / Dunzhu Xia, Cheng Yu and Lun Kong // Sensors. – 2014. – № 14. – P. 1394–1473, DOI: 10.3390/s140101394.
7. Бондарев С. С. Экспериментальные исследования баллистических гравиметров / С. С. Бондарев // Метрология. – 1986. – № 1.
8. Безвесільна О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри : [монографія] / О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖДГУ, 2007. – 604 с.
9. Безвесільна О. М. Вимірювання прискорень : підруч. / О. М. Безвесільна. – К. : Либідь, 2001. – 264 с.
10. Волосов С. С. Основы автоматизации измерений / Волосов С. С., Марков Б. Н., Педь Е. И. – М. : Изд-во стандартов. – 1984. – 368 с.

## References

1. Yuzefovich, A. P. and Ogorodova, L. V. (1980) Gravimetriya (Gravimetry). Moscow: Nedra [in Russian].
2. Tkachuk, A. H. and Bezvesilnaya, E. N. (2014) Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter. *Aviation*, (18), pp. 134–140.
3. Shigeru Tadano, Ryo Takeda, Hiroaki Miyagawa (2013). Three dimensional gait analysis using wearable acceleration and gyro sensors based on quaternion calculations. *Sensors*, (13), pp. 9321–9343.
4. Grushko, I. M. and Sidenko, V. M. (1983) Osnovy nauchnyh issledovaniy (Bases of scientific research). Harkiv, Vyscha shkola, 278 p. [in Russian].
5. Popov, E. I. (1987) Opredelenie sily tyazhesti na podvizhnom osnovanii (Determination of gravity on the movable base). Moscow: Nauka, 218 p. [in Russian].
6. Dunzhu, X., Cheng, Yu and Kong, L. (2014). The development of micromachined gyroscope structure and circuitry technology. *Sensors*, (14), pp. 1394–1473.
7. Bondarev, S. S. (1986) Eksperimentalnye issledovaniya ballisticheskikh gravimetrov (Experimental studies of ballistic gyro sensors). *Metrology*, (1) [in Russian].
8. Bezvesilna, O. M. (2007) Aviacyini gravimetrychni systemy ta gravimetry (Airborne gravity systems and gyro sensors). Zhytomyr: ZhSTU, 604 p. [in Ukrainian].
9. Bezvesilna, O. M. (2001) Vymiryuvannya pryskoren (Measuring accelerations). Kyiv: Lybid, 264 p. [in Ukrainian].
10. Volosov, S. S., Markov, B. N. and Ped, E. I. (1984) Osnovy avtomatizacii izmereniy (Basics of measurement automation), Moscow: Izd-vo standartov, 368 p. [in Russian].

**A. A. Ostapchuk**, *Ph.D., associate professor*  
 Zhitomir State Technological University  
 Chernyahovskyy str., 103, Zhitomir, 10003, Ukraine  
[ost\\_ann@mail.ru](mailto:ost_ann@mail.ru)

### AUTOMATION OF GRAVITY ACCELERATION MEASUREMENT WITH THE HELP OF BALLISTIC GRAVIMETER

*The article explores the possibility of increasing the accuracy of the characteristics of gravimetric apparatus constructed on the basis of lasers and photovoltaic cells, designs mathematical models of ballistic gravimeters and considers the possibility of building a functional diagram of the major modules of automated system of gravimetric measurements.*

*The aim of the article is to improve the accuracy of measuring gravity acceleration by examining absolute gravimetric device and the development based on scientific research of automated system of measurement values of gravity acceleration.*

*The measurement of absolute value of the acceleration due to gravity ( $g$ ) with high accuracy is a basic element for successful solution of a wide range of scientific problems: the definition of the form of the Earth, the construction of models of deep masses movement, the evaluation of elastic strain of the planet's surface, earthquake prediction, modeling of deep density inhomogeneities, the search of minerals, the use of  $g$  as a basis for the determination of other physical quantities. Hardware solutions to these problems are gravimetric scientific instruments.*

*Current research in the field of gravity of equipment is focused on two aspects: the first – improving the accuracy of ballistic gravimeters measurements by eliminating the effect of seismic vibrations on the measurement process, the second – the construction of efficient automated systems of gravimetric measurements.*

*Modern developments of such systems indicate that domestic appliances are now inferior after their technical characteristics (for ultimate precision measurements and other metrological parameters) to foreign developments. In addition, now in Ukraine the program of renovation of gravimetric equipment for strongholds of the national geodetic network is carried out.*

*A ballistic method for measuring the absolute value of the acceleration due to gravity  $g$ , which is determined by the results of the measurement path and the free-fall of an optical angle reflector, is*

*the operating principle of the gravimeter. The measurement of the path traveled by a falling body, by a laser interferometer, and a measure of time intervals are the signals of precision frequency standard.*

*The determination of absolute value of the acceleration of gravity is performed with an accuracy of 5-6 gravimeters microGal, which includes both instrumental error and measurement of the impact of external environment.*

*Ballistic gravimeter used must have an almost unlimited range of measurements, the instability of the wavelength of laser radiation during the observation period should not exceed  $5 \cdot 10^{-9}$ , relative standard error of frequency must be less than  $5 \cdot 10^{-10}$ , the pressure of residual gas in ballistic chamber should not exceed  $5 \cdot 10^{-6}$  mm Hg. column.*

*The task of measuring the gravity by ballistic methods is the measurement of length and time. Therefore, a mathematical model must identify analytical communication of the path traversed by test body with time and integrating external impacts. An approach to the construction of a model in which, on the one hand, free movement of test body in inertial coordinate system, taking into account vertical gradient and resistance forces, is considered and, on the other one, the law of motion of a coupled coordinates system, which moves under the influence of external inertial grouping and containing reference system gravimeter, is determined, will be the most constructive.*

*The main direction of the development is to improve the accuracy of ballistic gravimeters measurement by improving the system of data automated processing and the development of systems for video surveillance after the process of information obtaining that should eliminate errors and maximize measurement accuracy.*

**Keywords:** *gravity acceleration, ballistic gravimeter, measurement automation, measurement accuracy, mathematical model, instrumental error.*

*Рецензенти: В. П. Квасніков, д.т.н., професор,  
О. М. Безвесільна, д.т.н., професор*