

УДК 531.383

О.М. Безвесільна, д.т.н.
Є.В. Гура

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ АВІАЦІЙНОЇ ГРАВІМЕТРІЇ

Національний технічний Університет України “КПІ”

В статті проведено детальний аналітичний огляд теоретичних та експериментальних досліджень у галузі авіаційної гравіметрії. Показано перспективність гіроскопічних гравіметрів

Ключові слова: гравіметр, авіаційна гравіметрична система, гравітаційна аномалія.

Постановка задачі та її актуальність

Вимірювання гравітаційних аномалій на літаку у важкодоступних районах шельфів морів та гірських масивів є надзвичайно актуальним. Такі вимірювання проводяться авіаційною гравіметричною системою (АГС) [1] з різними типами гравіметрів. Однак, у літературі відсутній аналітичний огляд теоретичних та експериментальних досліджень у галузі авіаційної гравіметрії з різними типами гравіметрів. Тому, задача проведення такого аналітичного огляду є актуальною.

Мета статті: провести аналітичний огляд теоретичних та експериментальних досліджень у галузі авіаційної гравіметрії.

Викладення основної частини, аналіз досліджень і публікацій

У СНД дослідження в області авіаційних гравіметричних вимірювань розпочалися наприкінці 50-х років. Для літакових вимірювань використовували морські гравіметри ГАЛ-С, розроблені в аерогравіметричній лабораторії (тепер — відділ гравіінерціальних досліджень) під керівництвом Є. І. Попова в Інституті фізики Землі РАН. В основу перших моделей таких гравіметрів було покладено схему кварцового гравіметра, запропоновану в 1949 р. С. Є. Александровим. Однак остаточна думка про перспективність використання подібних пружних систем як чутливого елемента для вимірювань Δg на літаку склалася після теоретичного обґрунтування способу К.Є. Веселовим та успішних експериментів, проведених Л. П. Смирновим з макетом сильнодемпфованого гравіметра.

Першу спробу вимірювань на літаку із сильнодемпфованим гравіметром було зроблено Є. І. Поповим у 1957 р. Метою було виявлення можливості стійкого запису приладів, оцінка значень і характеру перешкод. Для досліджень використовували два гравіметри у важких карданових підвісах, призначених для вимірювань на підводному човні типу ГАЛ-С із фотографічною реєстрацією показань. Вимірювані здійснювали на літаку ІЛ-12 під час рейсових польотів за маршрутом Москва—Полтава на висоті близько 3000 м.

Визначення прискорення сили ваги на борту літака були відновлено й повторено в 1960 р. Використовували велику групу гравіметрів типу ГАЛ-С у карданових підвісах на літаках ІЛ-14, АН-2. Польоти виконували на спеціально підготовленому полігоні з наземною гравіметричною зйомкою. Характеристики гравіметра ГАЛ-С було успішно досліджено далі, в 1989—1997 рр., Інститутом фізики Землі РАН під керівництвом Є. І. Попова спільно з МІЕіА під керівництвом Л. Г. Полякова.

У ВНДІ Геофізики з кінця 60-х років вивчають проблеми аерогравіметричної зйомки. Під керівництвом А.М. Лозинської було створено діючий макет комплексу апаратури на базі струнних гравіметрів (типу ГС) і проведено дослідні вимірювання на літаках ІЛ-14, АН-24. Подальші ефективні дослідження й випробування ГС очолював В.О. Багрянц.

Застосування ГАЛ-С і ГС показали реальну можливість вимірювати прискорення сили ваги з борту літака з похибкою до 6...8 мГл. Результати вимірювань з ГАЛ-С і ГС обробляли на Землі після закінчення випробувальних польотів, тобто про швидкодію таких вимірювань не можна навіть говорити.

На великих швидкостях польоту частота корисного сигналу, що задається розмірами гравітуючих тіл, перебивається інерціальними перешкодами вертикальних переміщень літака. Облік таких рухів є найскладнішим завданням. Для цього неінерціальними засобами вимірюються варіації висоти польоту з похибкою порядку перших сантиметрів, обчислюються вертикальні прискорення, які віднімаються від показань гравіметра з урахуванням передатної функції останнього. Такі роботи проводилися у СНД і США. Прийнятний для практичного

використання результат уперше був отриманий в США тільки після застосування навігаційної системи GPS у диференційному режимі.

Спроби гравіметричних спостережень у повітрі здійснено американським ученим С. А. Хейландом ще в 1935 р. У 1956 р. у науково-дослідному центрі ВПС США в Кембриджі було проведено серію гравіметричних спостережень на повітряній кулі. У тому самому році в науково-дослідній медичній лабораторії ВПС США було випробовано спеціально модифікований для роботи в умовах літака гравіметр Ворста з похибкою вимірювань 20 мГл.

Перші вимірювання аномалій прискорення сили ваги на борту літака KC-135 було проведено в 1958 р. геофізичним і гравіметричним відділеннями геофізичного дослідного управління (AFCRL) ВПС США під керівництвом Томпсона і Ла-Коста. Комплекс містив встановлений у кардановому підвісі морський гравіметр Ла-Коста—Ромберга (L—R), що діяв при різних швидкостях літака на висоті польоту від 7 до 10 км над випробувальним полігоном Асканія (Askania). Похибка вимірювань становила близько 10 мГл.

У 1959 р. Інститутом геофізики (VCLA), службою гравірозвідки (GMES) і ВПС США під керівництвом Ла-Коста і Ромберга було випробовано гравіметр L—R, який мав швидкодіючу систему зчитування даних вищу, ніж раніше. Вимірювання здійснювали на борту літака B-17. Випробувальний полігон — Імперіал Веллі (Imperial Velley).

Мета проведення досліджень 1958—1959 рр. — визначення мінімальної похибки авіаційних гравіметричних вимірювань на серійному обладнанні. Було показано, що в цьому разі похибка не може перевищувати 10 мГл.

З 1960 по 1989 р. у США було досліджено можливості застосування морських гравіметрів і акселерометрів ракет, що легко піддаються модифікації, для точних авіаційних гравіметричних вимірювань.

У 1960 р. службою аерозйомки і картографії (APC5) разом із AFCRL було проведено випробування на борту літака C-130 першого гравіметра Ла-Коста—Ромберга (L—R—S), спеціально модифікованого для застосування на борту літака. Випробувальний полігон — Едварс АФБ (Adwards AFB). У 1961 р. службою картографії ВПС (ABS) США і головною філією гравіметричного відділення Ла-Коста було здійснено серію подальших льотних випробувань гравіметра L—R—S на борту літака B-17. Випробувальний полігон — Х'юстон Шреверпорт Бетон Ренж (Houston Shreveport Baton Range).

У 1962 р. AFCRL було проведено випробувальні польоти на борту літака C-130 з метою порівняння характеристик таких типів гравіметрів: десятої модифікації гравіметра L—R—S на нестабілізованій платформі; гравіметра Асканія—Граф GSS-2 типу В на вертикально стабілізованій платформі; гравіметра L—R—S на вертикально стабілізованій платформі. Випробувальний полігон — Асканія, Едвардс АФБ (Askania, Adwards AFB).

У грудні 1995 року і січні 1996 року було проведено перші льотні випробування авіаційного гравіметричного комплексу розробки НДІ Геофізики (Росія), Московського інституту електромеханіки та автоматики (з використанням інерціальної навігаційної системи (ІНС) Л-41). Район польотів — міста Воскресенськ та Коломна. Носій — вертоліт Мі-8. Обробкою гравіметричних даних незалежно займалися два колективи: НДІ Геофізики і лабораторія управління та навігації. Досягнута точність 10 мГл (колективи НДІ Геофізики і МГУ отримали однакові за точністю результати).

У липні-серпні 1999 року вперше в Росії була проведена повномасштабна зйомка: літак АН-26, район міста Калуги. Використовувались: струнні гравіметри розробки НДІ Геофізики, ІНС Л-41. Обробкою гравіметричних даних незалежно займалися колективи: НДІ Геофізики і МГУ - лабораторія управління та навігації. Було отримано однакові за точністю результати: ~ 1 мГл при 90 секундах осереднення.

У 1996 році розгортаються роботи з розробки гравіметричної системи (МІЕА-МДУ). Використовуються як гравіметри допрацьовані серійні російські акселерометри АК-6. Фінансування проекту здійснювала австралійська фірма World GeoScience Corp. Ltd. Було проведено три серії льотних випробувань: грудень 1997 (три польоти); травень 1998 (два польоти). Носій - літак АН-26, район польотів - місто Вологда.

Польоти також проводились у липні 1999 (один політ), носій - літак Л-410, район польотів - місто Брно, Чехія. Досягнута точність ~ 1 мГл при 90 секундах осереднення.

Результатом проведених випробувань є висновок про можливість побудови на існуючій елементній базі авіаційної гравіметричної системи з точністю ~ 0.5-0.7 мГл при 60 с осереднення.

Починаючи з 2000 року розгортаються спільні з ЗАТ "Гравіметричні технології", фірмою "Fugro Airborne Surveys" роботи з розробки гравіметричної системи МАГ-1. Була проведена

серія льотних випробувань у Вологодській, Ленінградській областях. У 2002 році в Західній Австралії були проведені багатопланові тестові випробування макетного зразка МАГ-1, які дозволили підтвердити високі точності цієї системи і зробити висновок про можливість проведення промислових гравіметричних зйомок на базі цього приладу і програмного забезпечення, розробленого у лабораторії управління та навігації.

У 2006 році «ДНВП Аерогеофізика» за допомогою гравіметричної системи МАГ-1 уперше в Росії провела масштабні аерографіметричні (у комплексі з аеромагнітними) роботи над шельфом. Зйомкою у масштабі 1:100000 була покрита центральна частина Охотського моря на площі 200000 кв. км у формі прямокутника довжиною 1000 і шириною 200 км. Вимірювання виконувалися по мережі рядових (меридіональних) і ортогональних їм опорних маршрутів на постійній барометричній висоті 300 м над рівнем моря зі швидкістю 330 км / год. Відстань між рядовими маршрутами – 10 км, між опорними – 100 км. Для оцінки точності були також проведені вимірювання на трьох діагональних і трьох повторних маршрутах.

В квітні - червні 2007 року вперше була проведена аерографіметрична зйомка за допомогою гелікоптеру. Дослідження проводилися в Узбекистані над урочищем Барсакельмес на плато Устюрт в 100 км на південний-захід від Аральського моря. Площа району робіт – 3000 кв. км. Відстань між рядовими маршрутами складала 250 м, між опорними – 2.5 км. Усього вимірювання були виконані на 18000 погонних км. Використовувалась гравіметрична система МАГ-1. Масштаб аерографіметричної зйомки 1:50000.

У період 2005-2007 років ГНПП «Аерогеофізика» (Росія) провела ряд аерографіметричних робіт по вивченню частини Східно - Сибірської платформи загальної площі 210 тис. кв. км. Використовувалось два літака Ан-26 та Ан-30 зі встановленими на них комплексами МАГ-4М. Відстань між рядовими маршрутами складала 500 метрів, між опорними – 10 км, таким чином, створена сітка була достатньою для проведення аерографіметричної зйомки масштабу 1:100000.

При виконанні гравіметричної зйомки з літака приймальна апаратура супутникових навігаційних систем GPS або ГЛОНАС реєструє координати і геодезичну висоту АГС у системі WGS-84, тому в процесі обробки координати і висоти перераховуються у систему, прийнятну в Росії. Нормальне поле обчислюється за формулою Гельмерта [1].

Сьогодні одними з *найперспективніших* авіаційних гравіметрів вважають нові типи гіроскопічних гравіметрів, принцип дії, аналітичні дослідження, експериментальні дослідження та дослідження на ЕОМ яких наведено у наукових працях і винаходах представників наукової школи з авіаційної гравіметрії НТУУ «КПІ» Безвесільної О.М., Литвиненка П.Л., Киричука Ю.В., Подчашинського Ю.О., Добржанського О.О., Коробійчука І.В., Остапчук А.В., Нечая С.О., Гури Є.В., Ткаченко С.С.

Безперечні *переваги* аерографіметричних вимірювань - це висока продуктивність, відносно низька вартість робіт; можливість виконувати гравіметричні зйомки над акваторіями і важко доступними територіями та вивчення гравітаційного поля Землі у тривимірному просторі (на різних висотних рівнях).

До *недоліків* авіаційних гравіметричних вимірювань слід віднести відсутність: точно виведеного рівняння руху АГС та математичних моделей гравіметрів різних типів, відсутність аналізу методичних похибок АГС, відсутність аналізу статичних та динамічних похибок гравіметрів. Всі ці задачі доцільно вирішити у майбутньому.

Деякі з недоліків слід вважати тимчасовими, тому що безперервно вдосконалюється апаратне та методичне забезпечення робіт. З урахуванням переваг і недоліків авіаційна гравіметрія у даний час може успішно вирішувати цілий ряд завдань, і, перш за все, використовуватися при оглядових зйомках масштабу 1: 200000.

Висновки

- показано перспективність та великі переваги авіаційних гравіметричних вимірювань;
- встановлено, що у відомій літературі: відсутнє точно виведене рівняння руху АГС, відсутні точно виведені математичні моделі гравіметрів різних типів, відсутній аналіз методичних похибок АГС, відсутній аналіз статичних та динамічних похибок гравіметрів. Всі ці задачі доцільно вирішити у майбутньому;
- показано, що одними з найбільш перспективних є гіроскопічні гравіметри різних типів.

Список літературних джерел

1. Безвесільна О.М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – 604 с.