

Разработка высокоточного относительного гравиметра «ПЕШЕХОД»

■ Донченко С. И., Фатеев В. Ф., Акпанбетов С. Б., Бобров Д. С., Давлатов Р. А.,
ФГУП «ВНИИФТРИ», Московская область, г. Солнечногорск.

Введение

Как известно, гравиметры находят широкое применение в различных областях науки, промышленности и техники, например:

- **в области геологии:** поиск, обнаружение и оконтуривание подземных неоднородностей плотности, например, месторождений углеводородов, рудных месторождений, разломов земной коры и т.д., контроль динамики разработки месторождений углеводородов;

- **в области инженерно-изыскательных работ:** контроль за наличием активных разломов, скрытых карстовых полостей и разуплотнений на площади строительства высокоскоростных Ж/Д магистралей, гидросооружений, атомных электростанций и других объектов особой важности;

- **в области навигации:** создание навигационных гравиметрических карт для систем автономной навигации подвижных средств по гравитационному полю Земли.

В России и за рубежом широко используются несколько типов высокоточных гравиметров. Характерными представителями иностранных приборов являются гравиметры фирм Micro-g LaCoste [1] и Scintrex Ltd [2]. Самое широкое распространение в мире и в России получили канадские гравиметры Scintrex CG-6(5) Autograv. Однако в настоящее время приобретение гравиметра Scintrex CG-6(5) Autograv невозможно из-за санкций и более того - невозможен ремонт уже поставленных гравиметров.

Вместе с тем, в соответствии с целями развития системы обеспечения единства

измерений, установленными Стратегией обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года [3], развитие средств измерений должно осуществляться преимущественно с использованием отечественных импортонезависимых технологий и приборной базы. Именно поэтому импортозамещение и восстановление отечественного парка гравиметров является приоритетной целью.

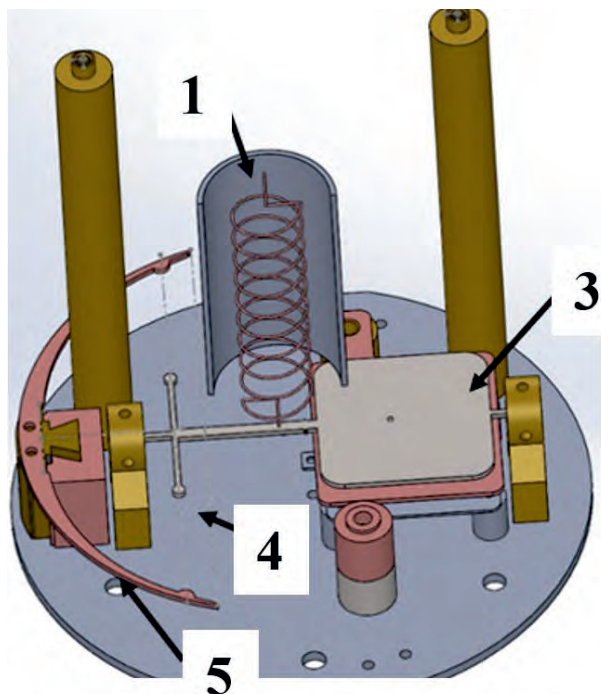
На текущий момент времени коллективом НТЦ №82 ФГУП «ВНИИФТРИ» ведутся работы по созданию действующего образца гравиметра «Пешеход». В качестве ориентира по массогабаритным и точностным характеристикам взят канадский гравиметр Scintrex CG-6 Autograv.

Наиболее значимыми блоками разрабатываемого гравиметра являются:

- чувствительная система;
- система термостатирования;
- система регистрации измерений и управления гравиметром.

Чувствительная система гравиметра

По аналогии с Scintrex CG-6 Autograv принцип действия гравиметра «Пешеход» основан на использовании прецизионных пружинных весов. Измерение силы тяжести определяется путем измерения величины растяжения пружины. Для оценки изменения длины пружины 1 (рисунок 1) под воздействием изменения гравитационного поля используется емкостная система съема перемещений, основанная на трехпластинчатом конденсаторе. Конденсатор имеет три пластины, две стационарные и третья

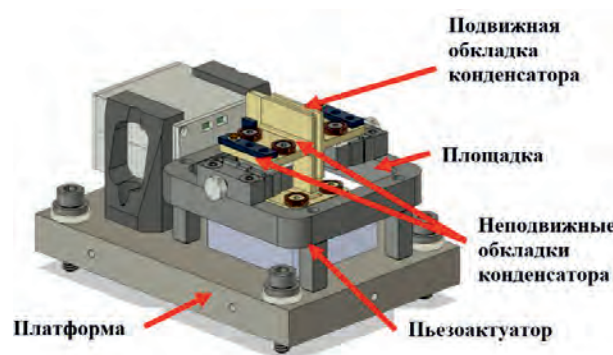


▲ Рис. 1. Общий вид чувствительной системы гравиметра.

подвижная между ними (она же – чувствительный элемент 3). Плоский чувствительный элемент 3 имеет специальный горизонтальный подвес на нити 4, натянутой между плечами специально термообработанного натяжителя 5.

При разработке чувствительной системы гравиметра много внимания уделялось материалам, из которых должны быть изготовлены элементы системы. Металлическую пружину и натяжитель необходимо изготовить из материала, который обеспечит высокие пружинные свойства. Кроме того, материал должен быть немагнитным для исключения влияния изменения магнитного поля при выполнении измерений гравиметром. Всем этим качествам соответствует сплав БрБ2 - бериллиевая бронза.

Предварительные расчеты параметров чувствительной системы гравиметра показали, что изменению гравитационного поля в 1 мкГал соответствует изменение положения чувствительного элемента на 0,65 нм. Для эксперимен-

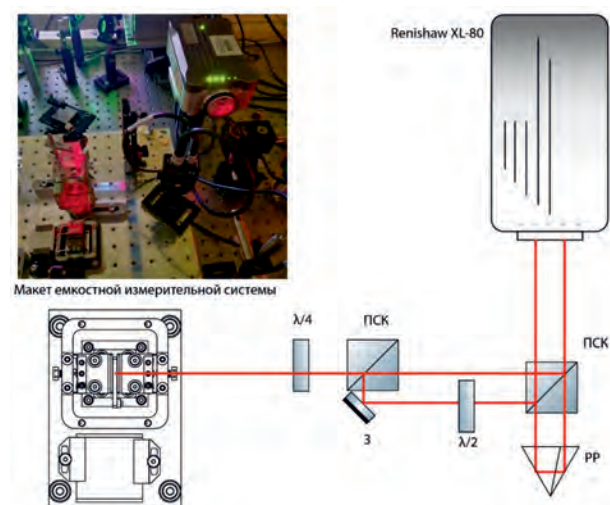


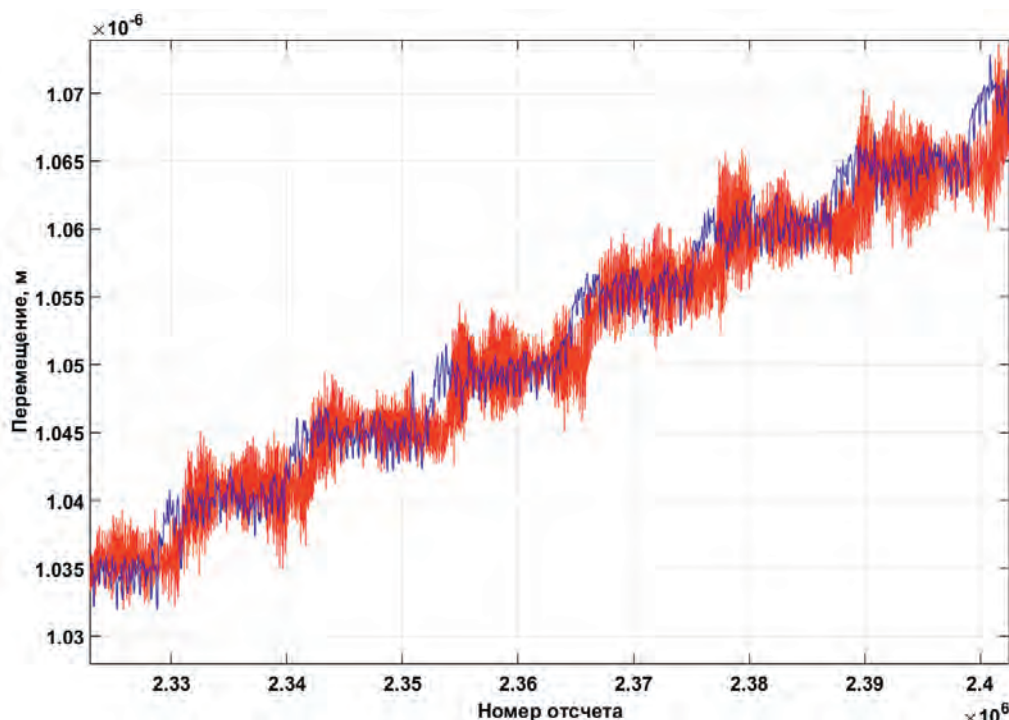
▲ Рис. 2. Общий вид измерительного стенда.

тальной проверки чувствительности емкостной системы съема был разработан измерительный стенд, внешний вид которого представлен на рисунке 2.

Стационарные обкладки размещены на площадке, которая неподвижно закреплена на платформе. Подвижная обкладка конденсатора установлена на пьезоактуаторе P-620.1 компании Physik Instrumente с помощью которого существует возможность перемещать среднюю обкладку конденсатора в диапазоне до 50 мкм с шагом 0,1 нм без удержания положения и с шагом 1 нм в режиме удержания положения. В качестве контрольной измерительной системы использовался интерферометр Renishaw XL-80, обладающий погрешностью измерений на уровне 0,1 нм при измерении перемещений в диапазоне первых микрометров. Измерительная схема

▼ Рис. 3. Измерительная схема.





▲ Рис. 4. Результат измерений при перемещении с шагом 5 нм.

представлена на рисунке 3.

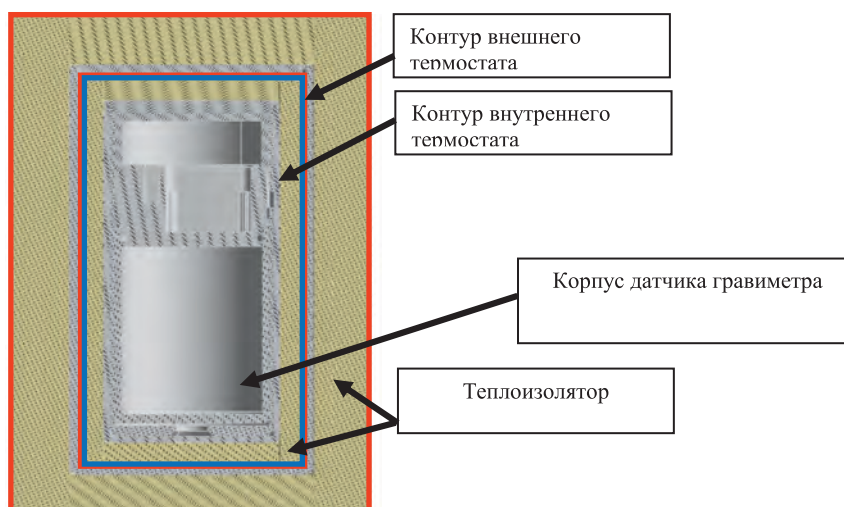
В качестве примера на рисунке 4 представлен результат измерений емкостной системы (красная кривая) и интерферометра Renishaw XL-80 при перемещении подвижной обкладки с шагом 5 нм.

Согласно полученным результатам, можно сделать вывод о том, что погрешность разработанной емкостной системы не превышает 0,63 нм, что соответствует расчетным требованиям к её чувствительности.

Система термостатирования

При изменении температуры среды вокруг чувствительной системы гравиметра, будет происходить кажущееся изменение силы тяжести, что, по сути, выражается в погрешности прибора. Кроме того, и используемые в плате гравиметра электронные компоненты также подвержены влиянию изменения температуры, что приводит к увеличению погрешности прибора. Для снижения температурного влияния разработана система двухконтурного термостати-

► Рис. 5. Схема системы термостатирования.



Материал	Легкость, кг/м ³	Прочность	Теплопроводность, Вт/м °С
Пенополистирол	22	Низкая	0,034
Пеностекло	100	Высокая	0,050
Пенополиуретан	100	Средняя	0,020

▲ Табл. 1. Сравнительная характеристика материалов для утеплителя.

рования с точностью поддержания температуры внутри датчика гравиметра до 0,001°C. Общий вид системы термостатирования представлен на рисунке 5.

Отдельной немаловажной задачей при проектировании системы термостатирования была задача выбора теплоизоляционного материала. Предварительные исследования показали, что существует 3 вида теплоизоляторов пригодных для использования, их характеристики представлены в таблице 1.

Окончательный выбор в пользу пенополиуретана был сделан после проведения экспериментальных исследований. Для этого в центр цилиндров, выполненных из пеностекла, пенополистирола и пенополиуретана, помещался терморезистор. Для измерения температуры использовался рабочий эталон МИТ 8.30. Цилиндры помещались в камеру тепла-

холода, в которой температура изменялась от 25°C до 50°C. Результаты эксперимента представлены на рисунке 6.

Анализируя полученные результаты можно заключить, что пенополиуретан обеспечивает наиболее плавное изменение температуры внутри цилиндра. На рисунке 7 представлены испытания всей системы термостатирования.

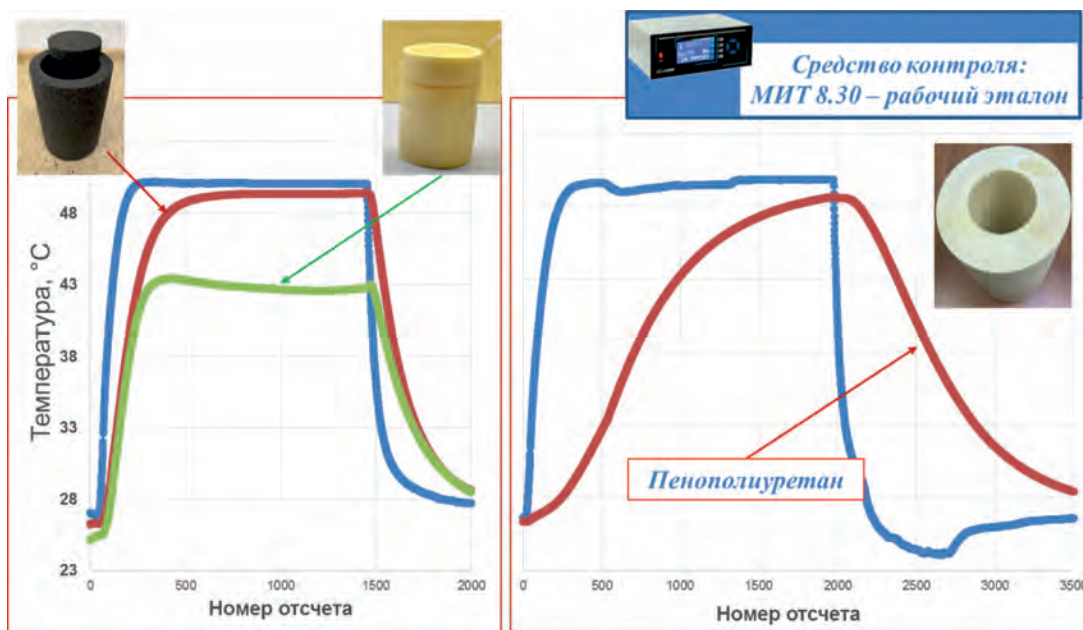
Достигнутая стабильность поддержания температуры внутри объема датчика гравиметра составила $\pm 0,001^\circ\text{C}$.

Система регистрации измерений и управления гравиметром

Одним из важнейших элементов гравиметра является специальное программное обеспечение, необходимое для выполнения следующих функций:

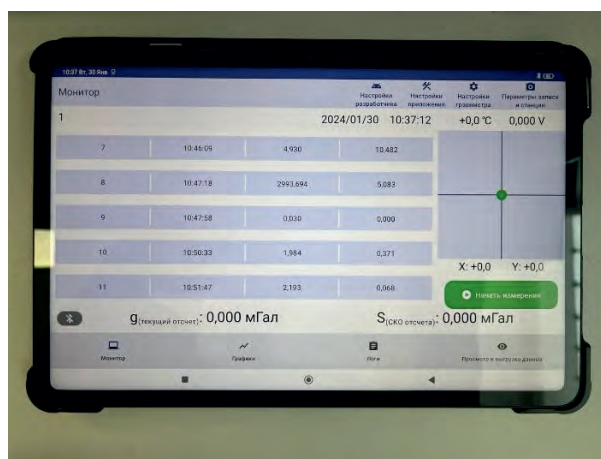
- формирование потока данных на Bluetooth;

▼ Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований теплоизоляционных свойств материалов.





▲ Рис. 7. Результаты испытаний системы двухконтурного термостатирования гравиметра.



▲ Рис. 8. Пример СПО, установленного на разные операционные системы, а) - планшет MIG T8X на Linux; б) - планшет на Android.

- статистическая обработка результатов измерений;
- формирование и учет поправок на влияние температуры, воздействия лунно-солнечных приливов, микросейсмических колебаний, наклона инклинометров, а также учет дрейфа гравиметра;
- визуализация, сохранение в базе данных и запись результатов измерений.

Специальное программное обеспечение (СПО) разрабатывается одновременно на двух операционных системах - на Android и Linux (рисунок 8), устанавливаемых на планшет или смартфон. Пример основного окна СПО представлен на рисунке 9.

Предварительные испытания гравиметра

В настоящее время проводятся испытания и отладка гравиметра «Пешеход». К концу 2023 года точность гравиметра методом наклона оценивалась на уровне 4 мкГал. Сейчас отладочные работы направлены на повышение долговременной стабильности гравиметра. К концу 2024 года запланировано завершение разработки гравиметра и выход на испытания в целях утверждения типа.

Заключение

Гравиметр «Пешеход» будет аналогом зарубежного гравиметра Scintrex CG-6



▲ Рис. 9. Основное окно СПО на базе Android.

Autograv по точности и эксплуатационным свойствам.

Вместе с тем, по сравнению с ним, он будет обладать следующими преимуществами:

1. Более высокой ударостойкостью в полевых условиях, поскольку используется металлический чувствительный элемент.
2. Возможностью серийного конвейерного изготовления всех элементов прибора, включая чувствительный элемент, что повысит повторяемость характеристик и снизит стоимость изготовления.

Литература

1. <https://microglacoste.com/product-category/land/>
2. <https://microglacoste.com/product/cg-6-autograv-gravity-meter/>
3. <http://static.government.ru/media/files/JZrtqXCDWoE02JAU1OSXkdi0OIXNB21B.pdf>