

А. В. СОКОЛОВ, А. А. КРАСНОВ, А. Б. КОНОВАЛОВ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КВАРЦЕВОЙ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОГО ГРАВИМЕТРА

Описана усовершенствованная технология изготовления кварцевой упругой системы гравиметров серии «Чекан», цель которой – автоматизация процессов изготовления составных частей упругой системы с целью повышения качества и производительности работ. Результаты стендовых и натурных испытаний упругой системы, изготовленной с использованием этой технологии, подтвердили соответствие требованиям, предъявляемым к чувствительным элементам современных мобильных гравиметров.

Ключевые слова: гравиметр, кварцевая упругая система, автоматизированная технология.

Введение

Чувствительный элемент морского гравиметра, представляющий собой двойную кварцевую упругую систему (УСГ), помещенную в демпфирующую жидкость, был создан более полувека назад в Институте физики Земли АН СССР. За прошедшие годы разработано несколько поколений гравиметрических комплексов на основе чувствительного элемента данного типа [1]. Использование кварца в качестве материала для чувствительных элементов инерциальных датчиков позволяет добиться стабильных механических характеристик [2–4].

Все это время технология изготовления УСГ оставалась неизменной [5]: мастер-кварцевед вручную обрабатывает заготовки из кварцевого оптического стекла и собирает систему. Обработка кварца производится в расплавленном состоянии, для чего он должен разогреваться до температуры свыше 2000°C посредством пламени водородно-кислородной горелки. Для большинства промышленных материалов плавление не требует такой высокой температуры, а соответственно, смесь водорода и кислорода не является традиционной для газовых горелок. Кроме того, сложность изготовления заключается в миниатюрных размерах УСГ и ее деталей. В современных гравиметрах габариты деталей не превышают 60 мм, а их диаметр составляет от 0,08 до 2 мм. При этом существенно, что точность чувствительного элемента гравиметра напрямую зависит от точности выполнения элементов упругой

Соколов Александр Вячеславович. Кандидат технических наук, генеральный директор, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; Университет ИТМО (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID: 0000-0002-6423-1591.

Краснов Антон Алексеевич. Кандидат технических наук, начальник отдела гравинерциальных и оптоэлектронных комплексов, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; Университет ИТМО. Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID: 0000-0003-0298-2418.

Коновалов Алексей Борисович. Ведущий инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

системы. С учетом перечисленных особенностей ручное изготовление кварцевой упругой системы доступно только опытному мастеру, а продолжительность этой работы может составлять до одного месяца.

В настоящее время сохраняется потребность в проведении высокоточных гравиметрических работ в интересах геологоразведки, геодезии и высокоточной инерциальной навигации [6–10]. Широкий круг задач выполняется с использованием современных относительных гиросtabilизированных гравиметров серии «Чекан» [11–25]. В связи с этим актуальной является задача сохранения и усовершенствования технологии изготовления кварцевой УСГ данной серии, которой и посвящена настоящая работа.

Конструкция упругой системы гравиметра

Основные элементы УСГ схематично изображены на рис. 1. Ее основу составляет маятник на кварцевом торсионном подвесе, представляющий собой кварцевый стержень, на конце которого жестко закреплен свинцовый груз, а ближе к оси вращения приварено зеркало. С противоположной стороны к маятнику приварен противовес таким образом, чтобы общий центр масс зеркала и противовеса находился на оси вращения упругой системы [26].

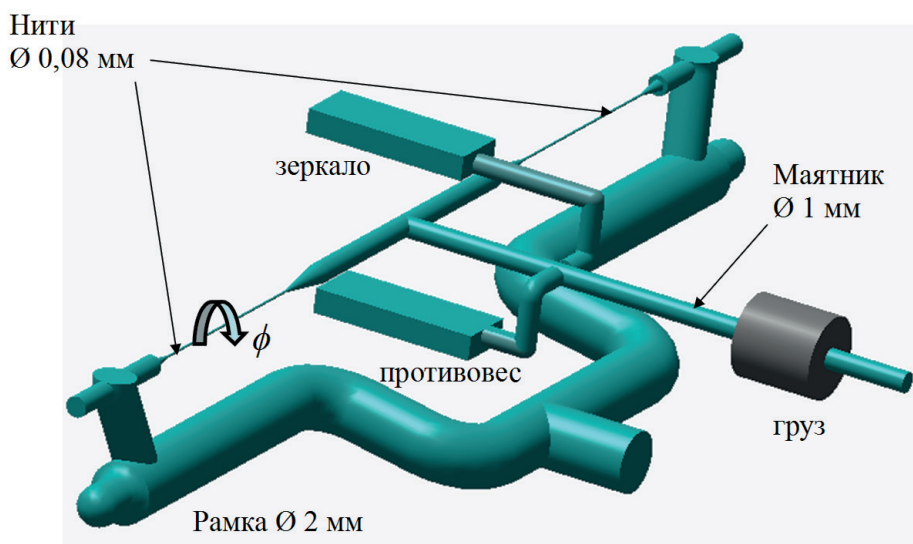


Рис. 1. Элементы упругой системы

Нити торсионного подвеса предварительно закручены на угол ϕ так, чтобы положение маятника было близко к горизонтальному при погружении в вязкую жидкость (с учетом действия архимедовой силы). При изменении ускорения силы тяжести маятник отклоняется от первоначального горизонтального положения на угол $\Delta\phi$, который и является мерой изменения ускорения силы тяжести.

Две описанные кварцевые системы размещаются в прямоугольном разъемном корпусе из титана, который заполняется вязкой жидкостью и герметизируется. В центре корпуса имеется отверстие, куда вклеено плоскопараллельное стекло, являющееся оптическим окном для съема сигнала об угловом положении маятников.

Измерение этих углов производится с помощью оптико-электронного преобразователя, жестко закрепляющегося на корпусе упругой системы.

С целью компенсации влияния орбитального эффекта, вызванного взаимным воздействием на чувствительный элемент гравиметра вертикальных и горизонтальных инерционных ускорений, маятники упругих систем развернуты в горизонтальной плоскости на 180° друг относительно друга. При изготовлении важно обеспечить параллельность осей вращения маятников, а также идентичность их геометрических размеров и упругости нитей торсионного подвеса, поскольку их различие ликвидирует преимущества описанной системы перед другими типами чувствительных элементов мобильных гравиметров [27].

Создание кварцевых стержней для деталей УСГ

Отечественной промышленностью выпускаются заготовки из кварцевого оптического стекла в виде дисков, пластин и стержней различного размера. С учетом геометрической формы наиболее подходящими для создания деталей УСГ являются стержни диаметром 12 мм. Тем не менее процедура плавления кварцевой заготовки и вытяжка стержней вручную с уменьшением диаметра заготовки до требуемого с использованием традиционной технологии – крайне трудоемкие процессы. К тому же данные операции представляют опасность для кварцевува, так как из-за большой толщины исходной заготовки ему приходится подолгу прогревать материал с применением экстремально высоких температур. В связи с перечисленными трудностями одной из первых задач была автоматизация производства кварцевых стержней для нитей, маятников и рамок упругой системы диаметром 0,08, 1 и 2 мм соответственно. Оригинальным решением данной задачи стало использование автоматической технологической линии, применяемой в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» при изготовлении кварцевого оптического волокна для гироскопов и гидроакустических датчиков. При этом удалось запрограммировать работу линии на вытяжку кварцевых стержней на порядок большего диаметра по сравнению с оптическим волокном.

Операция вытягивания из заготовок кварцевых стержней требуемых диаметров выполняется на лабораторной башне OFC-20SF высотой около 10 м [28]. Заготовка зажимается в центрирующем патроне в верхней части башни. Нижний конец заготовки расплавляется при температуре $2100\text{--}2300^\circ\text{C}$, и из печи под действием силы тяжести выходит вытягиваемый стержень. Диаметр стержня контролируется при помощи оптического датчика, и обеспечивается автоматическая подстройка скорости подачи заготовки и скорости вытягивания. Описанная технология обеспечивает высокую точность изготовления стержней – $\pm 0,005$ мм, которая недоступна при ручной обработке заготовок. Скорость вытяжки стержней на лабораторной башне составляет 2 м/мин. Очевидно, что реализованная автоматизированная технология создания кварцевых стержней и традиционная ручная несопоставимы по точности и производительности.

Вытяжка нитей торсионов УСГ

Для приваривания нитей торсиона УСГ к рамке они должны иметь утолщения на концах, которые невозможно сформировать при вытяжке волокна на лабораторной

башне. В связи с этим для автоматизации процесса изготовления нитей торсиона УСГ лабораторная башня может быть использована только для вытяжки заготовок диаметром 0,5 мм, из которых затем необходимо изготовить нити требуемой формы.

Ручной процесс вытягивания нитей представляет собой одну из самых сложных операций в работе мастера-кварцедува. Одна упругая система требует двух пар идентичных нитей, изготовление которых даже у кварцедува с многолетним опытом работы занимает несколько дней, поэтому ключевой задачей, направленной на повышение качества УСГ и производительности работы, стала автоматизация процесса вытяжки нитей торсиона УСГ.

В основу разработанной технологической установки было положено описанное в [5] приспособление для вытягивания и контроля симметричности нитей. Была спроектирована и изготовлена технологическая установка на базе схвата CGLN-10-040 двунаправленного действия с повторяемостью хода $\pm 0,1$ мм. Кварцевый стержень диаметром 0,5 мм при помощи магнита зажимается между двумя колодками схвата. Кварцедув с использованием пламени горелки размягчает кварцевый стержень, а затем по его сигналу пневматическая система схвата с заданной скоростью раздвигает колодки на расстояние, соответствующее длине нити упругой системы. Сразу после вытягивания нити путем медленного сдвига колодок выполняется контроль ее симметричности. Далее на отдельном технологическом приспособлении проверяется упругость нити и прочность на кручение [5]. При контроле упругости нити определяется ее сравнительный угол закручивания по отношению к нити, принятой за эталонную для изготавливаемой партии. Произведенная партия нитей, удовлетворяющих заданным требованиям, хранится в вакуумном контейнере для сохранения упругих свойств.

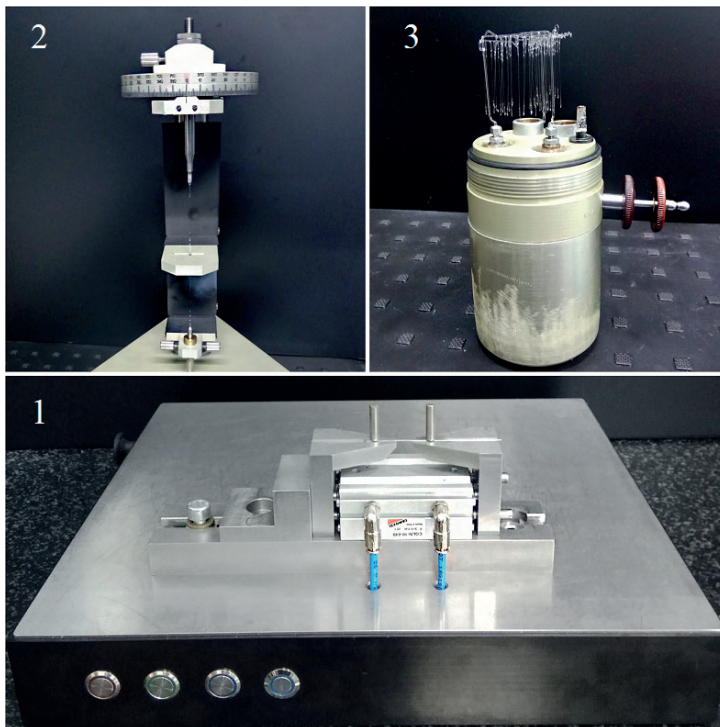


Рис. 2. Установка для вытягивания нитей (1), приспособление для контроля упругости нитей (2), вакуумный контейнер для хранения нитей (3)

При использовании описанной установки диаметр вытягиваемой нити зависит от постоянства разогревающего пламени, толщины заготовки, закона движения колодок и ширины размягченного участка стержня. Из-за постоянства толщины заготовок и воспроизводимости закона раздвижения колодок установка обеспечивает высокую степень идентичности кварцевых нитей. Так, для партии нитей в количестве 30 шт. разброс значений длины не превысил 7%, а упругости – 10%. Необходимо отметить, что эта партия, включая контроль симметричности и упругости нитей, была изготовлена за 5 ч. Производство аналогичной партии по традиционной технологии даже у опытного кварцедува потребовало бы на два порядка большего времени.

Дальнейшее совершенствование установки может быть направлено на синхронизацию моментов времени нагрева кварцевого стержня и раздвигания колодок, что позволит стабилизировать длину размягченного участка заготовки и еще более повысить уровень идентичности вытягиваемых нитей.

Изготовление деталей и сборка упругой системы

Постоянство температуры разогревающего пламени крайне важно не только при вытягивании нитей, но и при выполнении любой технологической операции как по изготовлению деталей, так и по свариванию элементов упругой системы. Необходимость подстройки пламени горелки отвлекает кварцедува, что доставляет дополнительные трудности в работе с миниатюрными деталями при экстремальных температурах. А неправильно выбранная температура пламени на финальных этапах сборки может привести к разрушению УСГ. Для упрощения работы кварцедува магистрали подачи газа были оборудованы автоматическими системами регулирования пламени горелки, построенными на базе электронных расходомеров Siera Smart-Trak 100. При этом все операции с кварцевыми заготовками (изгиб, резка, приваривание) были классифицированы по необходимым типам пламени, которые характеризуются различным соотношением водорода и кислорода в подаваемой на горелку газовой смеси (рис. 3).

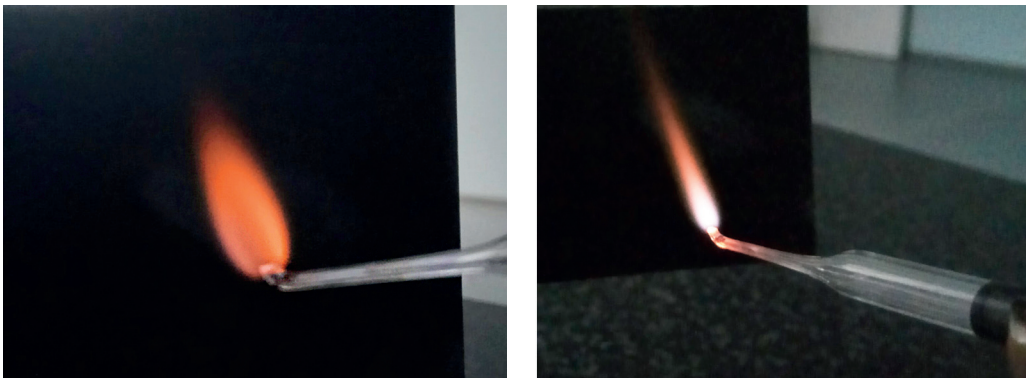


Рис. 3. Типы пламени, характеризующиеся различным соотношением водорода и кислорода

Перед выполнением технологической операции кварцедуву достаточно лишь выбрать соответствующие уставки расхода газа на цифровом табло расходомеров, а далее система автоматического регулирования поддерживает заданный тип пламени вне зависимости от изменения окружающей среды и уменьшения давления газа

в баллонах. Отказ от ручной регулировки пламени при работе с газовой горелкой существенно облегчил работу кварцевдува.

Сами этапы сборки упругой системы соответствуют традиционной технологии [5]. Для каждой из одинарных кварцевых систем, входящих в двойную, последовательно выполняются следующие операции: сваривание маятника с нитями, установка маятника с нитями на рамку, натягивание нитей, формовка груза на маятнике, температурная компенсация и, наконец, установка системы в корпус.

Перед привариванием нитей к маятнику выбирается комплект из 4 нитей на двойную упругую систему. Выбор осуществляется исходя из двух условий:

- 1) отличие длины рабочей части нитей без утолщений на концах должно быть менее 2 мм,
- 2) отклонение сравнительного угла закручивания нитей – менее 1%.

Для приваривания нитей к маятнику, а также выполнения других операций с кварцевыми деталями разработан и изготовлен комплект манипуляторов. На рис. 4 приведено изображение маятника, закрепленного на одном из манипуляторов после завершения операции приваривания к нему нитей.

Существенным отличием новой технологии является то, что в связи с упрощением конструкции упругой системы не требуется сборка кварцевых деталей на технологической рамке; сборка маятника с нитями выполняется непосредственно на рабочей рамке. Контроль положения отдельных элементов при сборке осуществляется с использованием как традиционных концевых мер длины, так и современных цифровых индикаторов Garant 43 с предельной погрешностью измерений $\pm 0,02$ мм.

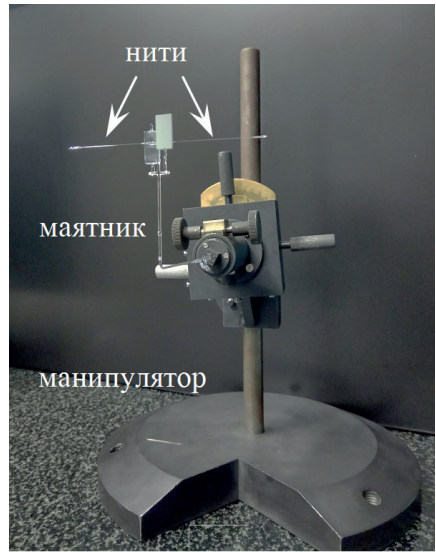


Рис. 4. Сборка маятника с нитями

После приваривания маятника с нитями к рамке выполняется натягивание нитей дозированной силой 1 Н, которую создают путем подвешивания через технологический блок гири. Затем приступают к осуществлению температурной компенсации, которая основана на том, что при повышении температуры упругость кварца увеличивается, а плотность жидкости, в которую он погружен, уменьшается [5]. Компенсация осуществляется предварительным закручиванием нитей, при этом требуется обеспечить расчетный угол закручивания маятника в воздухе, который определен с учетом упреждения на всплытие маятника при погружении в жидкость.

Температурная компенсация осуществляется в два этапа. На первом этапе маятник без груза, подвешенный на нитях, закручивается до горизонтального положения в прямом и обратном направлениях. Если средний угол закручивания отличается от расчетного, то выполняется коррекция рычага маятника либо путем укорачивания маятника, либо посредством сдвига зеркала и противовеса. Далее проверка путем закручивания нитей повторяется, пока угол закручивания не достигнет требуемого значения.

На втором этапе выполняется формовка груза на маятнике с использованием разъемного тигля. При этом наплавление груза производится с припуском, который затем уменьшается при подгонке угла закручивания.

Установка кварцевых систем в корпус производится по линиям разметки, что обеспечивает непараллельность осей вращения маятников не более $10'$. Далее выполняется регулировка положения зеркал: они должны быть параллельны осям маятников. Положение зеркал контролируется при помощи оптико-электронного преобразователя гравиметра, при этом на экране компьютера в рабочей программе размечены поля допусков для соответствующих бликов от зеркал маятников. В случае если маятник занимает положение, не соответствующее допуску, производится коррекция положения зеркала.

С применением описанной технологии был собран опытный образец упругой системы гравиметра, внешний вид которой представлен на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид упругой системы (верхняя крышка корпуса снята)

Заполнение корпуса УСГ демпфирующей жидкостью

После установки кварцевых систем корпус закрывается и производится его заполнение демпфирующей жидкостью. Для обеспечения требуемых динамических характеристик гравиметра используется полиметилсилоксановая жидкость вязкостью около $30 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Чтобы не допускать образования воздушных пузырей в герметичном корпусе упругой системы, заполнение должно осуществляться под вакуумом. А с учетом большой вязкости жидкости для ускорения процесса необходимо обеспечить подогрев жидкости. Для решения задачи заполнения УСГ демпфирующей жидкостью была разработана автоматизированная технологическая установка (рис. 6). Установка состоит из насоса, прибора индикации и управления, а также вакуумной камеры, представляющей собой притертый к основанию прозрачный колпак. Используемый насос обеспечивает уровень среднего вакуума с остаточным давлением порядка 133 Па (1 мм рт. ст.).

Заполнение корпуса упругой системы жидкостью осуществляется следующим образом. Вначале под вакуумом жидкость подогревается до температуры $+45^\circ\text{C}$ и в течение 2 ч выполняется дегазация, пока не прекратится выделение из жидкости растворенного в ней воздуха в виде пузырей. После этого дистанционно, без нарушения вакуума, открывается электромагнитный клапан, и жидкость через подводя-

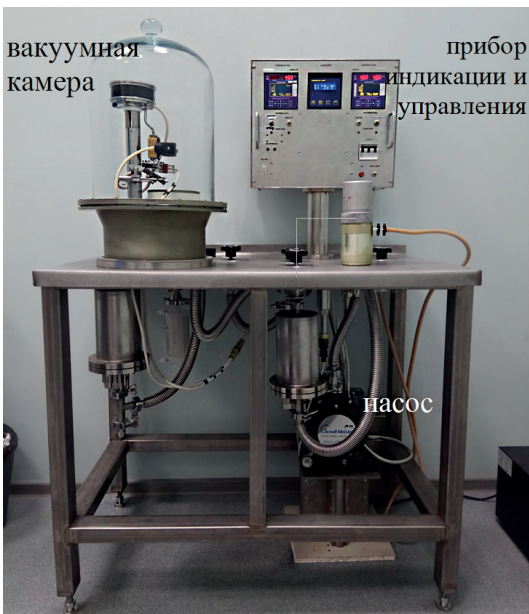


Рис. 6. Установка для заполнения корпуса упругой системы жидкостью

щую трубку поступает в фильтровальный узел, а затем по желобу в полость корпуса упругой системы. После заполнения корпуса жидкостью клапан так же дистанционно закрывается и проверяется наличие воздушных пузырей в упругой системе путем наклона корпуса на небольшие углы в разных направлениях. При хорошем качестве заполнения корпус упругой системы герметично закрывается, и таким образом перекрывается прямой контакт жидкости с воздухом. Описанная процедура занимает около 20 ч и обеспечивает гарантированное заполнение корпуса упругой системы жидкостью без пузырей.

К установке предусмотрено также подключение вакуумного контейнера, предназначенного для хранения нитей упругой системы. После откачивания воздуха и контроля вакуума контейнер отключается от насоса и хранится автономно.

Регулировка и испытания упругой системы

Отладка собранной и заполненной жидкостью упругой системы производится с использованием оптико-электронного преобразователя из состава штатной системы съема данных в чувствительном элементе гравиметров серии «Чекан». Преобразователь работает в автоколлимационном режиме. Положению маятников кварцевой системы соответствуют изображения светящейся щели на КМОП-матрице преобразователя, как это показано на рис. 7.

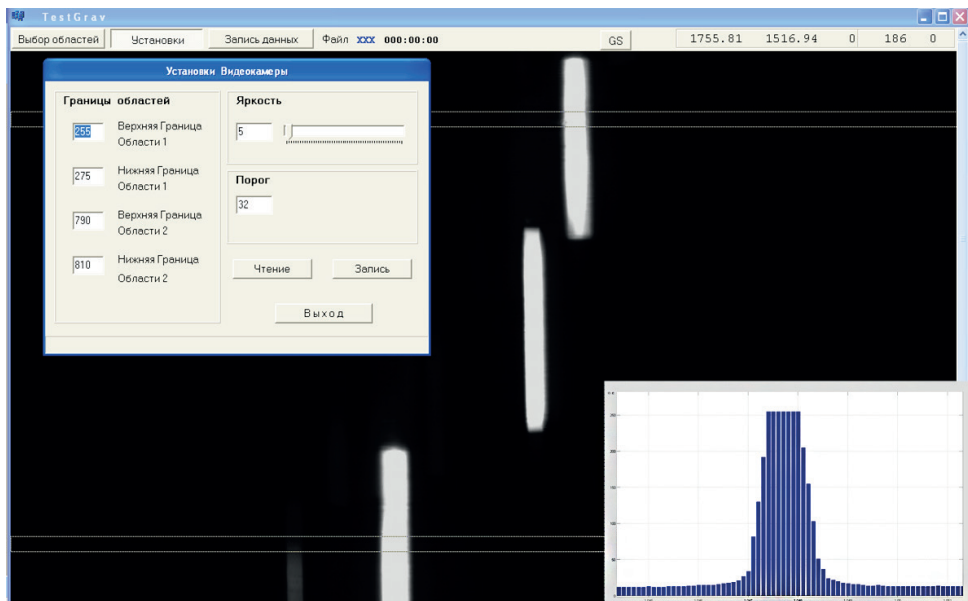


Рис. 7. Вид рабочей программы при юстировке оптико-электронного преобразователя

При отладке выполняется юстировка положения маятников в поле зрения оптико-электронного преобразователя, а также с использованием автоматизированной процедуры [29] методом наклона в гравитационном поле производится предварительная оценка масштабного коэффициента и постоянной времени упругой системы.

Изготовленный по описанной технологии образец упругой системы был испытан в составе серийного гравиметра «Чекан-АМ». Целью испытаний являлась проверка точностных характеристик гравиметра.

Первые несколько месяцев после изготовления упругой системы наблюдения проводились на неподвижном основании, при этом контролировалось смещение нуль-пункта гравиметра. За четыре месяца смещение нуль-пункта уменьшилось с 20 мГал/сут. до приемлемого значения 2 мГал/сут., что типично для кварцевых систем гравиметра (рис. 8). Это позволило приступить к проверке точностных характеристик гравиметра на динамических стендах, в термокамере и в условиях морской гравиметрической съемки.

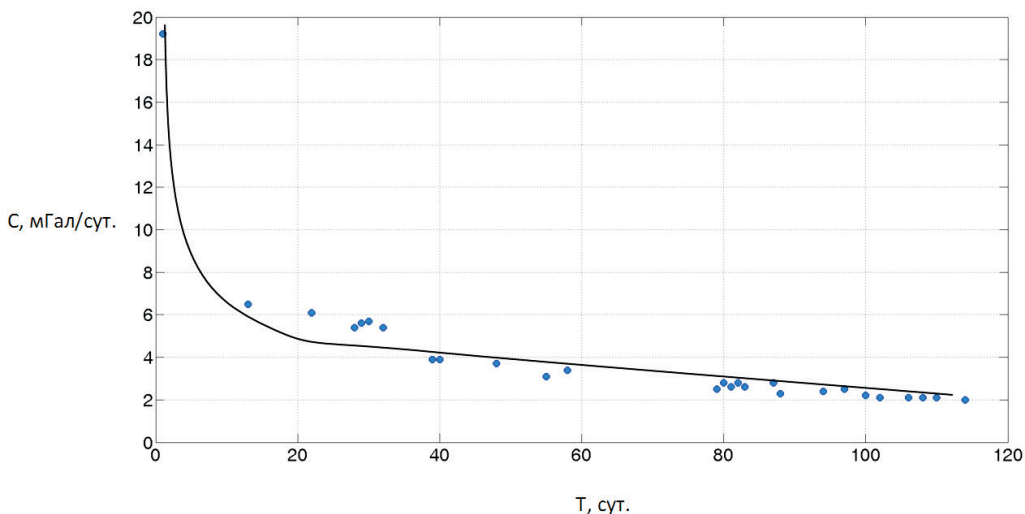


Рис. 8. Изменение смещения нуль-пункта гравиметра

Результаты стендовых испытаний показали, что среднеквадратическая погрешность гравиметра, обусловленная ускорениями качки, не превысила 0,1 мГал. Систематическая погрешность измерений при изменении температуры окружающей среды в диапазоне от +5°C до +35°C составила менее 0,5 мГал. Полученные величины погрешностей соответствуют уровню точности гравиметра «Чекан-АМ», что подтверждает высокое качество изготовления упругой системы.

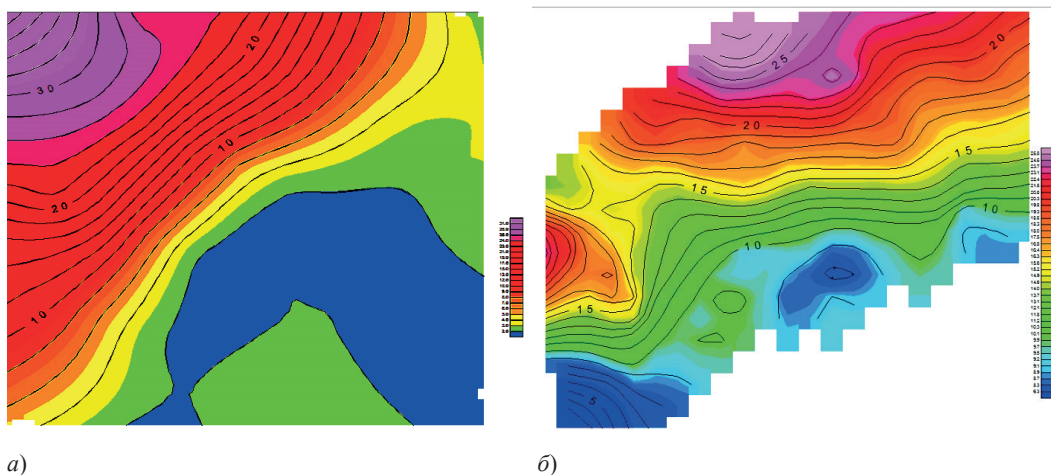


Рис. 9. Гравиметрическая карта по данным глобальной модели EGM-2008 (а) и по результатам морской съемки (б)

Морская гравиметрическая съемка проводилась в акватории Ладожского озера с борта малоразмерного катера. Была выполнена сеть измерительных профилей на площади 10×20 км. Среднеквадратическая погрешность съемки оценивалась по невязкам измерений в точках пересечения профилей и составила 0,30 мГал. В результате построена гравиметрическая карта масштабом 1:100 000, приведенная на рис. 9, б. На рис. 9, а приведена карта аномалий силы тяжести исследованного района по материалам глобальной модели геопотенциала EGM-2008. Видно, что морская съемка позволяет получить более детальную картину гравитационных аномалий по сравнению с данными модели, в основу которых положены материалы космических геодезических исследований.

Результаты стендовых и натуральных испытаний упругой системы, изготовленной по усовершенствованной технологии, подтвердили полное соответствие требованиям, предъявляемым к чувствительным элементам современных гравиметров серии «Чекан».

Заключение

В АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разработана и внедрена автоматизированная технология изготовления кварцевой упругой системы мобильных гравиметров, в которой использованы современные достижения фотоники, вакуумных и цифровых технологий. Автоматизация наиболее сложных и трудоемких операций позволила повысить качество изготовления упругой системы, в десятки раз увеличить производительность работы мастера, а также снизить требования к квалификации кварцедува.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 18-19-00627 (<https://rscf.ru/project/18-19-00627/>).*

ЛИТЕРАТУРА

1. Пешехонов В.Г., Соколов А.В., Железняк Л.К., Береза А.Д., Краснов А.А. Вклад навигационных технологий в создание мобильных гравиметров // Гироскопия и навигация. 2019. Т.27. №4 (107). С. 162–180.
2. Madni, A.M., Costlow, L.E. and Knowles, S.J., Common design techniques for BEI GyroChip quartz rate sensors for both automotive and aerospace/defense markets, *IEEE Sensors Journal*, 2003, vol. 3, no. 5, pp. 569–578. DOI: 10.1109/JSEN.2003.817728.
3. Jeanroy, A., Grosset, G., Goudon, J.-C., Delhaye, F., HRG by Sagem from laboratory to mass production, 2016 *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems*. DOI: 10.1109/ISISS.2016.7435530.
4. El-Sheimy, N., Youssef, A., Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends, *Satellite Navigation*, December 2020, 1(1):2. DOI: 10.1186/s43020-019-0001-5.
5. Кочетков Б.М., Попов Е.И. Упругая система морского гравиметра // Аппаратурные и опытно-методические работы по морской гравиметрии. М.: Наука. 1973. С. 6–31.
6. Пешехонов В.Г. и др. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / Под общей ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГИЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
7. Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Погорелов В.В., Соловьев В.Н., Афанасьева Л.В. Изученность гравитационного поля Арктики – состояние и перспективы // Физика Земли. 2016. №3. С.113–122.
8. Пешехонов В.Г. Проблема уклонения отвесной линии в высокоточной инерциальной навигации // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №4 (111). С. 3–15.

9. **Носов А.С., Степанов О.А., Торопов А.Б.** Навигационная информативность геофизических полей и выбор траекторий в задаче уточнения координат с использованием карты // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2018. №5. С. 74–92.
10. **Степанов О.А., Носов А.С.** Алгоритм коррекции навигационной системы по данным карты и измерителя, не требующий предварительного оценивания значений поля вдоль пройденной траектории // *Гироскопия и навигация.* 2020. Том 28. №2 (109). С. 70–90. DOI 10.17285/0869-7035.0029.
11. **Соколов А.В., Краснов А.А., Железняк Л.К.** Методы повышения точности морского гравиметра // *Гироскопия и навигация.* 2019. Т. 27. №2 (105). С. 70–81.
12. **Соколов А.В., Краснов А.А., Коновалов А.Б.** Измерения ускорения силы тяжести с борта воздушных носителей различных типов // *Измерительная техника.* 2016. №6. С. 10–13.
13. **Форсберг Р., Олесен А.В., Эйнарссон И.** Проведение аэрогравиметрических измерений гравиметрами «ЛАКОСТА-РОМБЕРГ» и «Чекан-АМ» с целью определения геоида // *Гироскопия и навигация.* 2015. №3 (90). С. 19–29.
14. **Журавлев В.А., Челышев С.В., Кочетов М.В.** Опыт использования гравиметра ЧЕКАН и перспективы развития морской гравиметрии в ОАО МАГЭ // *Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д.Г.Успенского – В.Н.Страхова.* Воронеж, 2020. С. 124–127.
15. **Железняк Л.К.** Особенности работы морского гравиметрического комплекса «Чекан-АМ» и обработки получаемых результатов // *Геофизические исследования.* 2020. Т.21. №4. С. 70–81.
16. **Железняк Л.К., Конешов В.Н., Михайлов П.С.** Экспериментальное определение вертикального градиента силы тяжести ниже поверхности моря // *Физика Земли.* 2016. №6. С. 83–85.
17. **Глазко В.В., Шустов Е.Б., Филабок Н.Н.** Морские гравиметрические комплексы и гравиметры гидрографической службы Военно-Морского Флота РФ // *Навигация и гидрография.* 2011. №32. С. 79–87.
18. **Паламарчук В.К., Глинская Н.В., Кирсанов С.Н., Макаров В.М., Субботин К.П., Бурдакова Е.В., Мищенко О.Н.** Уникальная аэрогеофизическая лаборатория «Магнит» для выполнения комплексных аэрогеофизических исследований полярных акваторий и территорий // *Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки.* 2013. №2. С. 66–70.
19. **Кулинич Р.Г., Валитов М.Г.** Морская гравиметрия в акваториях Японского и Охотского морей // *Технические проблемы освоения Мирового океана.* Т.7. 2017. С. 222–226.
20. **Казанин Г.С., Заяц И.В., Иванов Г.И., Макаров Е.С., Васильев А.С.** Геофизические исследования в районе Северного полюса // *Океанология.* 2016. Т. 56. №2. С. 333–335.
21. **Казанин Г.С., Барабанова Ю.Б., Кириллова-Покровская Т.А., Черников С.Ф., Павлов С.П., Иванов Г.И.** Континентальная окраина Восточно-Сибирского моря: геологическое строение и перспективы нефтегазоносности // *Разведка и охрана недр.* 2017. №10. С. 51–55.
22. **Sinem, I.E., Förste, C., Barthelmes, F., Pflug, H., Li, M., Kaminskis, J., Neumayer, K.-H., Michalak, G.,** Gravity Measurements along Commercial Ferry Lines in the Baltic Sea and Their Use for Geodetic Purposes, *Marine Geodesy*, 2020, vol. 43, no. 6, pp. 573–602.
23. **Förste, C., Sinem, I.E., Johann, F., Schwabe, J., Liebsch, G.,** Gravimetry Activities on the Baltic Sea in the Framework of the EU Project FAMOS, *Fachbeitrag*, Jg. 5/2020, 145, pp.287–294. DOI 10.12902/zfv-0317-2020.
24. **Forsberg, R., Olesen, A., Ferraccioli, F., Jordan, T., Matsuoka, K., Zakrajsek, A., Ghidella, M., Greenbaum, J.,** Exploring the Recovery Lakes region and interior Dronning Maud Land, East Antarctica, with airborne gravity, magnetic and radar measurements, *Geological Society*, London, Special Publications, 20 September 2017, 461, 23–34.
25. **Lu, B., Barthelmes, F., Petrovic, S., Forste, C., Flechtner, F., Luo, Z., He, K., Li, M.,** Airborne gravimetry of GEOHALO mission: data processing and gravity field modeling, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122, 10, 586–10, 604.
26. **Железняк Л.К., Попов Е.И.** Упругая система гравиметра типа УСГ // *Приборы и методы обработки гравиинерциальных измерений.* М.: Наука. 1984. С. 54–66.
27. **Nabighian, M.N., Ander, M.E., Grauch, V.J.S., Hansen, R.O., LaFehr, T.R., Li, Y., Pearson, W.C., Peirce, J.W., Phillips, J.D., Ruder, M.E.,** Historical development of the gravity method in exploration, *Geophysics*, 2005, vol. 70, no. 6, pp. 63–89.
28. **Жиро А.** NEXTRON: 30 лет на службе высоких производственных технологий в оптоволоконной индустрии // *Фотоника.* 2015. №4 (52). С. 6–11.
29. **Соколов А.В., Краснов А.А., Элинсон Л.С., Васильев В.А., Железняк Л.К.** Калибровка гравиметра «Чекан-АМ» методом наклона // *Гироскопия и навигация.* 2015. № 3 (90). С. 41–51.

Sokolov, A.V., Krasnov, A.A. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia; ITMO University, St. Petersburg, Russia), **and Konovalov, A.B.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia) Automation of Mobile Gravimeter Quartz Elastic System Manufacturing Technology, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2021, vol. 29, no. 2 (113), pp. 35–46.

Abstract. The paper describes an improved technology of quartz elastic system manufacturing for the gravimeters of Chekan series; its purpose is to automate the manufacturing processes of the elastic system elements to improve the work quality and performance. The elastic system manufactured using this technology has been tested on a bench and in field, and the results confirmed its compliance with the requirements set for the sensitive elements of modern mobile gravimeters.

Key words: gravimeter, quartz elastic system, automated technology.

Материал поступил 28.04.2021