150 ЛЕТ ВЗВЕШЕННЫХ РЕШЕНИЙ

Рассказывает специалист по весоизмерительному оборудованию компании Sartorius Виктор Сергеевич Милокумов

Что может быть проще весов? С этим древнейшим типом измерительного инструмента мы сталкиваемся чуть ли не каждый день. Казалось бы, все уже придумано. Однако прогресс стремителен, и вот уже место гирь занимают электромагнитные поля, эталон килограмма из платино-иридиевого цилиндра превращается в сложнейшие весы Киббла и привязывается к постоянной Планка. Не удивительно, что сегодня наиболее совершенные весы предлагают корпорации с мировыми именами, ведущие производители аналитического оборудования. Среди них – компания Sartorius, которая за 150 лет из небольшой мастерской превратилась в одного из лидеров рынка биотехнологического оборудования. Однако от своих корней не отказалась – весы и сегодня составляют заметную долю в бизнесе Sartorius, причем самые разные, от учебных до сложнейших компараторов массы и объема.

Об особенностях весов Sartorius и их уникальных свойствах, о новом эталоне килограмма, о перспективах и проблемах на российском рынке – наш разговор со специалистом по весоизмерительному оборудованию компании Sartorius Виктором Сергеевичем Милокумовым.

Виктор Сергеевич, компания Sartorius известна как значимый игрок на рынке биофармацевтического и фильтрационного оборудования. Однако для многих Sartorius ассоциируется именно с весами. Насколько это направление актуально сегодня?

Весы – это визитная карточка нашей компании. С них все началось в 1870 году в университетском городе Геттингене. Там Флоренс Сарториус для производства весов собственной конструкции основал компанию Feinmechanische Werkstatt F. Sartorius (мастерская точной механики Ф. Сарториуса). Весы Сарториуса быстро обрели популярность в университетских кругах Геттингена, а затем и во всей Германии. И неудивительно: эти рычажные весы отличались быстрой стабилизацией за счет оригинальной конструкции с короткими коромыслами и применения нового конструкционного материала – алюминия. Примечательно, что алюминий тогда только начали выпускать в промышленных масштабах, а у истоков его производства стоял химик Фридрих Велер из того же Геттингенского университета.

Собственно, в Sartorius всегда уделяли много внимания разработке новых технологий и подходов. Если отойти от темы весов, можно вспомнить, что в 1916 году будущий нобелевский лауреат, специалист в области

DOI: 10.32757/2619-0923.2021.5.19.8.17

коллоидной химии Ричард Зигмонди совместно с Вильгельмом Бахманном изобрели мембранный фильтр, а в 1922 году – технологию суперфильтрации. Это решение компания Sartorius немедленно поставила на промышленные рельсы, направление фильтрационных материалов и технологий играет для нас ключевую роль и сегодня.

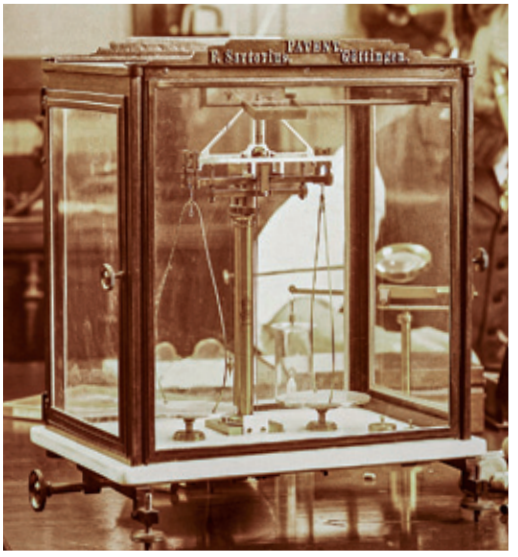
Примеры, когда мы первыми внедряли технологию, которая затем получала широкое распространение, далеко не единичны. В частности, в 1952 году Sartorius выпустила весы Selecta. Тогда в ходу были гиревые равноплечие весы – на одну чашку нагружается проба, а на другую помещаются гири. В Selecta была лишь одна чашка для образцов, оператор просто крутил ручку, а гири сами подвешивались ко второму плечу коромысла весов. В такой конструкции гири меньше изнашивались, они были защищены от падений, грязи и пыли. А сам процесс взвешивания стал гораздо проще и удобнее. Это был огромный шаг вперед, весы Selecta стали настоящим мировым хитом – в 1958 году был продан их 100-тысячный экземпляр – и мгновенно сделали компанию Sartorius одним из лидеров рынка.

В 1954 году под руководством Теодора Гаста в Sartorius разработали Elektrono 1 – первые в мире весы с электромагнитной компенсацией силы тяжести. В них уже не было гирь, принцип работы стал совсем иным. К чашке с образцом крепилась катушка индуктивности, а под ней располагался постоянный магнит. Ток в обмотке катушки создавал магнитное поле, которое взаимодействует с полем магнита, сила этого взаимодействия пропорциональна величине тока. Когда чашка нагружена, катушка стремится сместиться, и нужно увеличить ток, чтобы она

Основатель компании Sartorius Флоренс Сарториус

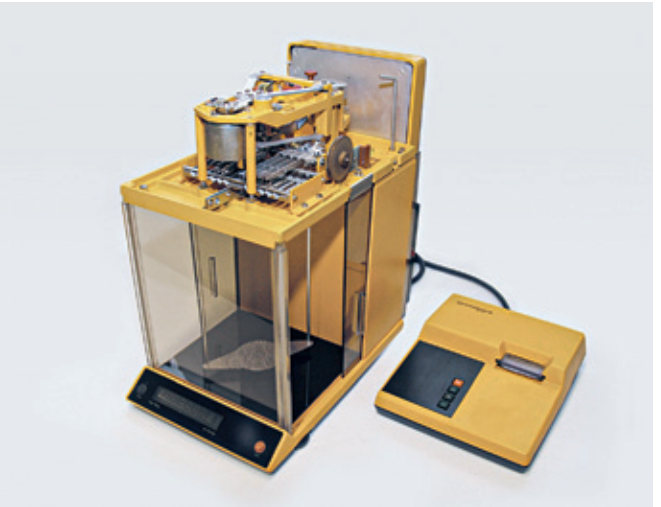
оставалась в начальном положении. Измеряя ток, можно определять массу нагрузки.

Весы Elektrono 1 также стали прорывом, однако не обрели такого коммерческого успеха, как Selecta, – еще не было удобных средств индикации. Время этой технологии пришло в 1970-х годах, с появлением цифровых дисплеев и микропроцессоров. В 1976 году компания Sartorius выпустила первые полностью электронные весы, работающие на принципе электромагнитной компенсации силы тяжести. А сегодня 99% всех лабораторных весов в мире рабо-

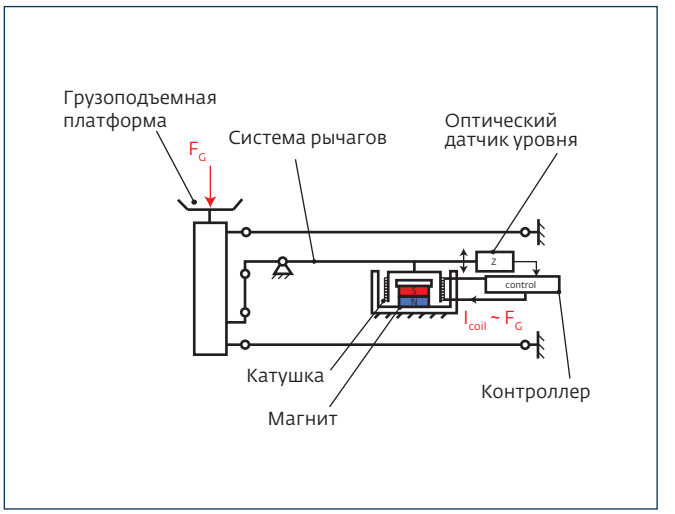


Первые весы Sartorius

Весы Selecta – бестселлер Sartorius 1950-х. Справа – встроенный механизм переключения нагрузки



Первые массовые полностью электронные весы Sartorius с электромагнитной компенсацией силы тяжести



Принцип работы весовой ячейки

тают по принципу, впервые реализованному 75 лет назад в Elektrono 1.

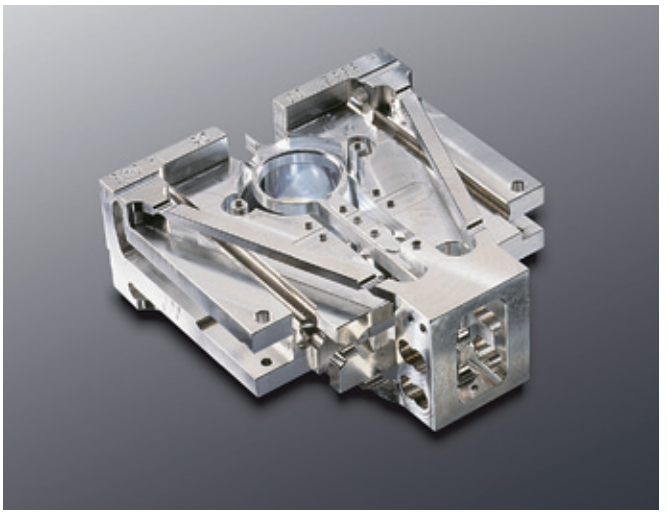
Еще одна наша фирменная технология – монолитная весовая ячейка. Вместо того чтобы собирать весоизмерительный механизм из полутора сотен деталей, мы делаем всю систему из заготовки из алюминиевого сплава. Идея конструкции остается прежней: чашка крепится к короткому плечу коромысла, к длинному плечу – катушка индуктивности, под ней расположен магнит. На конце длинного коромысла размещена щелевая диафрагма, по обе стороны от нее находятся светодиод и фотодиоды, образующие датчик положения. Электронная система управления изменяет ток в катушке так, чтобы коромысло не смещалось под воздействием нагрузки. Конечно, все рычажные элементы должны быть ограниченно подвижными. Это обеспечивается утончением определенных зон рычага – так формируются своеобразные шарниры.

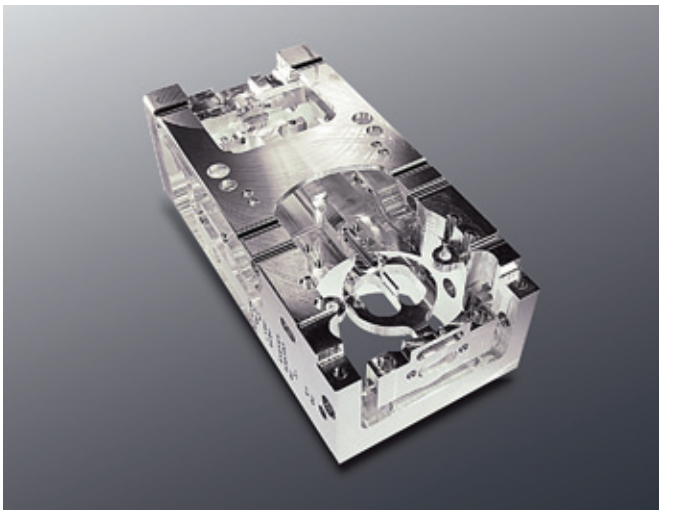
Впервые монолитная весовая ячейка была разработана компанией Sartorius в 1994 году. В 1997 году мы запустили первую серию весов Genius на ее основе. В 2009 году появились весы Cubis с монолитной ячейкой второго поколения. А представленные в 2019 году весы Cubis II получили уже третье поколение весовой ячейки – вне всякого сомнения, одно из лучших в мире. За счет особенностей конструкции и системы управления она обеспечивает самую высокую производительность и стабильность измерений. Конечно, мы не единственная компания, которая использует подобный подход. Практически все производители высокоточных весов используют монолитные весоизмерительные модули. Принципиальное отличие Sartorius – в степени интеграции различных узлов в эту монолитную конструкцию. У нас все элементы системы электромагнитной компенсации – основание катушки и магнита, щелевая диафрагма, основания для светодиода и фотоприемника – выполнены в виде единой детали. Что обеспечивает ряд уникальных преимуществ.

В первую очередь весовые ячейки Sartorius обладают очень высокой термостабильностью – при изменении температуры коэффициент теплового расширения одинаков во всей конструкции. Взаимное расположение всех элементов, и прежде всего системы позиционирования и катушки, остаются неизменными.

Вторая особенность – очень низкая погрешность из-за эксцентриситета нагрузки. Это один из самых больших источников погрешности в работе любых лабораторных весов. Ведь если груз расположен не строго по центру грузоприемной платформы, создается дополнительный момент силы, передающийся на измерительную систему, что приводит к ощутимой погрешности. И величина ее достаточно велика – у всех весов, кроме Sartorius. Скажем, у аналитических весов Sartorius с диапазоном измерения до 220 г погрешность при максимальной нагрузке не превышает 0,1–0,2 мг. И все благодаря уникальной конструкции весоизмерительной ячейки. Чаша с пробой установлена на платформе, к которой подключены четыре тензодатчика, которые измеряют и компенсируют угловой момент, возникающий вследствие нецентрального положения нагрузки. Это исключает появление паразитных моментов силы, передающихся на измерительный механизм и искажающих результаты измерений.

Кроме того, конструкция ячейки защищает весь механизм от перегрузки. Если нагрузка чрезмерна, она передается на раму весов, не повреждая ее измерительные элементы.





Монолитная весовая ячейка Sartorius: первая модель и современная

Как достоинства конструкции весоизмерительной ячейки Sartorius отражаются на метрологических характеристиках?

Начнем с того, что мы первыми в мире в 1996 году представили сверхточные весы с разрешением 0,1 мкг и с 21 млн отсчетов на диапазон измерений. А сегодня в серии весов Cubis II есть модели с максимальной массой от 2 г с относительной погрешностью 10^{-7}, т.е. точность измерений в нормальных условиях составляет 200 нг. Причем если при малых навесках такими показателями можем похвастаться не только мы, то при увеличении максимальной массы Sartorius оказывается вне конкуренции.

Так, мы производим большегрузные весы серии Cubis (весовые блоки Cubis 36S/66S) для прецизионного измерения малых масс в относительно тяжелой таре. В частности, при максимальной нагрузке до 61 г весовой блок Cubis 66S обеспечивает разрешение по массе до 1 мкг. То есть при достаточно больших навесках мы обеспечиваем 61 млн отсчетов на диапазон измерения. Пожалуй, при таких массах это мировой рекорд по разрешающей способности весов.

Другой пример – лабораторный компаратор массы MCM60K3 на основе монолитной ячейки. При диапазоне измерений 64 кг дискретность отсчета составляет 2 мг. Сохранение относительной разрешающей способности при росте массы – это, если хотите, фирменная особенность весов Sartorius.

Вы упомянули о двух линейках весового оборудования, которое сегодня поставляет Sartorius. Но ведь номенклатура весоизмерительной продукции вашей компании не ограничивается только ими?

Мы выпускаем несколько линеек весоизмерительного оборудования, от приборов начального уровня до сложнейших компараторов массы. Линейки премиум-класса – Cubis и Cubis II. Их ключевая особенность – модульное решение, т.е. возможность укомплектовать весовой модуль различными вариантами ветрозащитных витрин, блоков управления, а также пакетов программного обеспечения и дополнительного оборудования. Это позволяет, с одной стороны, подобрать индивидуальную конфигура-

Модульные весы Cubis II с одним из вариантов ветрозащитной витрины, встроенным ионизатором и модулем управления MCA

цию весов, максимально соответствующую измерительным задачам и рабочим процессам пользователя, а с другой – обеспечивает гибкость в отношении бюджета.

Конечно, помимо модульности, линейка Cubis II вобрала в себя все возможности современных лабораторных весов. В первую очередь Cubis II – это самые лучшие весоизмерительные ячейки: самые высокопроизводительные, самые стабильные, самые точные. Кроме того, в этих весах предусмотрена масса функций, упрощающих процесс измерений, – от автоматического контроля за уровнем поверхности весов, положением створок ветрозащитной витрины и встроенного ионизатора до программного обеспечения, управляющего процессом измерений. Например, под задачи фармацевтической отрасли разработан пакет Pharma, автоматизирующий типовую обработку результатов измерений, обеспечивающий защиту и достоверность данных и т.п.*

Не меньшего внимания заслуживает серия весов Secura. Это высокоточный, производительный инструмент для исследовательских и рутинных лабораторных анализов. Чуть меньше возможностей предоставляют линейки Quintix. Сейчас мы начинаем выводить на рынок весы семейства Entris II, которое включает в себя две серии: BCE с базовым функционалом и серию BCA – с расширенным, всего более 40 различных моделей. Их отличает наилучшее в отрасли соотношение цена/качество. Конечно же, отмечу и наше российское весовое производство. В этом году мы полностью обновили модельный ряд весов, производимых нашей компанией ООО "Сартогосм", и представили серию весов CE+, получивших ряд важных и полезных функций. Мы выпускаем и самую простую серию весов Practum, предназначенных в основном для учебных задач.

Чем принципиально отличаются друг от друга линейки, помимо метрологических характеристик и модульной конструкции?

Отмечу, что в каждой линейке десятки моделей весов. И каждая линейка обладает своей спецификой. Поэтому, выбирая весы, лучше всего обсудить с нами вашу измерительную задачу, и мы обязательно предложим оптимальный вариант. Но если говорить об основных отличиях, давайте рассмотрим уровень автоматизации и защиту от ошибок.

Мало иметь точный измерительный инструмент, важно еще и правильно им пользоваться. А любой оператор – это человек, ему свойственно ошибаться, даже самому аккуратному и внимательному. И цена такой ошибки, например в ходе рутинных анализов в производственных лабораториях, может быть очень высока. Поэтому требования к целостности данных, их защите от любого несанкционированного доступа содержатся во многих национальных отраслевых стандартах, и в первую очередь в фармацевтике. Конечно, человек изобретательнее любой "защиты от дурака", но все же ряд типовых ошибок наши весы способны предотвратить.

В первую очередь, несмотря на все совершенство конструкции весовой ячейки, результаты измерений зависят от температуры. Соответственно, при определенном изменении температуры нужна калибровка весов. Самый простой вариант – это внешняя юстировка. На весы ставится гиря определенной массы, нажимается кнопка "Калибровка", и микроконтроллер пересчитывает калибровочные коэффициенты. Такие весы мы не выпускаем, кроме серии Practum, – они поставляются только в учебные учреждения, чтобы тренировать студентов. Все остальные весы Sartorius оснащаются внутренним калибровочным грузом. Это не просто удобно – исключена ошибка установки не той гири, ее невозможно взять грязными руками, как-то повредить. Но в этом случае оператору приходится самостоятельно следить за изменениями температуры и вручную запускать процесс калибровки. Это чревато ошибками, поэтому наши весы оснащены датчиками температуры, при ее определенных отклонениях калибровка запускается автоматически. Возможна и автокалибровка через заданные промежутки времени. Причем все данные калибровки сохраняются в памяти весов. Подобные возможности мы закладываем и в новые модели линейки CE+.

Для точных измерений весы необходимо выставить строго горизонтально. Для этого предусмотрены датчики уровня. Самый простой из них – пузырьковый. Ими оснащены весы линеек CE+, Entris II BCE и Quintix. Оператору при каждом запуске нужно следить за горизонтальностью весов по уровню, при необходимости подкручивать винтовые ножки. Более продвинутые линейки – Secura, Entris II BCA и Cubis – оснащены оптикоэлектронными датчиками уровня. Весы этих моделей сами следят за своей горизонтальностью и выдают оператору на дисплее интерактивные подсказки, какую ножку в какую сторону крутить. В линейке Cubis II оператору вообще ничего крутить не нужно. Там предусмотрен моторизованный привод регулировочных опор. Достаточно нажать кнопку, и весы сами себя выставят по уровню.

Важно отметить, что весы старших моделей блокируют возможность сохранения данных измерения или запуска измерительной задачи, если не выполнена автокалибровка или платформа не горизонтальна. Работа

* Подробнее см.: **Милокумов В.С.** Лабораторное весовое оборудование. Тренды – модульность и автоматизация // Лаборатория и производство. 2019 (9). № 5. С. 44–48.

с весами также может быть заблокирована, если масса образца меньше минимально допустимого значения. Такая функция реализована в весах серии Cubis и Cubis II, Secura и Entris II BCA.

На точность измерений косвенно влияет и относительная влажность воздуха. Когда она низкая, на образцах может накапливаться статический заряд. При взвешивании он взаимодействует с другими электрическими полями и заряженными поверхностями, что влечет дополнительную погрешность. Для снятия статического заряда предусмотрены ионизаторы воздуха, их широко используют в лабораторной практике. Но весы серии Cubis II можно оснащать ионизаторами, встроенными в ветрозащитную витрину, с настраиваемым автозапуском. Стоит закрыть витрину, ионизатор запускается, что полностью исключает погрешности от статического заряда.

Плотность воздуха вы тоже учитываете?

Плотность воздуха определяет силу Архимеда, воздействующую на образец. Но вариации плотности воздуха на порядки меньше плотности любого исследуемого материала. Поэтому ее принимают в расчет только при поверке гирь класса точности E_1. Чтобы полностью исключить влияние воздуха, все манипуляции с госэталоном массы выполняют в вакууме.

Конечно, есть специфические задачи, когда нужно взвешивать материалы с очень низкой плотностью, например бумажные фильтры. Для таких применений в весах Cubis II можно установить климатический датчик. Он измеряет температуру, влажность и давление, на основе этих данных специальное программное приложение рассчитывает плотность воздуха и вносит поправку в результаты измерений. Но в подавляющем большинстве лабораторных задач это не нужно.

Вы упомянули про производство линейки весов CE+ в России компанией "Сартогосм". С какой целью она была организована?

ООО "Сартогосм" – это производственное предприятие компании Sartorius. Оно было основано в Санкт-Петербурге в 1991 году – сегодня мы отмечаем его 30-летний юбилей. В первую очередь "Сартогосм" занимается производством гирь, как отдельных, так и цилиндрических, для установки внутрь весов. Мы выпускаем гири классов точности E_1, E_2, F_1, F_2, M_1 с номинальной массой от 1 мг до 20 кг. "Сартогосм" поставляет эти гири не только в Россию, но и в Германию.

Также "Сартогосм" выпускает серию весов CE+. Подчеркну, это именно отдельная линейка со своими особенностями, а не локализованный аналог, и производится она только в Санкт-Петербурге. Разумеется, все основные компоненты – весовая ячейка, измерительная электроника, блок управления – делают в Германии. Но специально под серию CE+. В результате мы получаем более дешевый инструмент, который обладает всей базовой функциональностью и метрологическими характеристиками весов Sartorius. Более низкие цены обусловлены локальной сборкой и некоторым упрощением функциональных возможностей.

В серии CE+ 28 моделей, начиная от аналитических весов на 120 и 220 г с точностью до четвертого знака после запятой до весов на 8 кг с ценой деления 100 мг. Они получили ряд современных функций, таких как уже упомянутая автоматическая калибровка по времени и температуре, возможность передачи данных на ПК без использования дополнительного ПО и ряд других усовершенствований, включая современный коммуникационный порт USB Type-C. Но в первую очередь весы производства "Сартогосм" известны за свою высокую точность, надежность и долговечность. Они работают долгие годы в таких условиях, что мы сами порой поражаемся. Эти весы отлично решают поставленные задачи там, где постоянны проливы, просыпания и перемещения. Их очень широко применяют в сфере производства пищевых продуктов, кормов, переработки сельскохозяйственной продукции. Они великолепно зарекомендовали себя в нефтяной и в угольной промышленности, в черной металлургии – везде, где не стоит рассчитывать на работу в чистых помещениях и предельно аккуратное обращение.

Конечно, для предельно жестких условий эксплуатации, для наиболее ответственных применений, например в атомной промышленности, предназначены весы Cubis. Но для рутинных задач во многих случаях CE – оптимальный выбор.

Как широко ваше оборудование распространено в России, какие направления вы считаете для себя приоритетными?

У нас несколько приоритетов. Есть области, где мы сильны традиционно. Прежде всего это сфера метрологии. Мы много работаем с Росстандартом, центрами стандартизации и метрологии (ЦСМ), метрологическими институтами. Практически в любом региональном ЦСМ как минимум половина всех компараторов массы – от Sartorius. Во ВНИИ метрологии им. Д.И.Менделеева (ВНИИМ) установленный наш вакуумный компаратор массы – единственный в СНГ. В 2020 году он был включен в состав первичного государственного эталона единицы массы. Разумеется, там же действует автоматический компаратор Sartorius

Сусцептометр YSZ01C /YSZ02C

для рабочих эталонов. Подобные автоматические компараторы используются и во ФБУ "УРАЛТЕСТ", и в Главном научном метрологическом центре министерства обороны. Собственно, мне неизвестны случаи применения в России автоматических компараторов массы других производителей.

Мы активно развиваем сотрудничество с метрологическими центрами. Причем компания предлагает комплексное оснащение лаборатории: не только сами компараторы и весы, но и гири всех классов точности, которые выпускает наше российское подразделение "Сартогосм". Подчеркну, мы – единственный в России производитель гирь самого высокого класса точности E_1. Кроме того, мы периодически выполняем заказы на вторичные государственные эталоны массы, которые могут использовать только ЦСМ. У них допуски по погрешности в 3 раза меньше, чем у гирь класса E_1. Для управления процессом поверки гирь мы предлагаем специальное программное обеспечение "СартоКомп". Также компания выпускает каменные столы для взвешивания, установки для определения плотности образцов (компараторы объема), приборы для определения магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности согласно требованиям ГОСТ OIML R111-1-2009, станции климатических измерений. Не забываем мы и про различные аксессуары: перчатки, держатели, пинцеты и пр. Фактически мы можем с нуля оснастить лабораторию для метрологии массы.

Но ведь не только на метрологии сфокусированы интересы Sartorius?

Разумеется. Мы концентрируемся и на промышленных задачах. Очень сильны наши позиции в горнорудной и металлургической отрасли, особенно в области цветных металлов и золота. Наше оборудование используется при работе с драгоценными камнями. Мы активно сотрудничаем с различными структурами Росатома, причем как в плане метрологии, так и при оснащении лабораторий и обеспечении их работы. Этому немало способствует возможность работы наших весов в условиях жестких ионизирующих излучений.

Кроме того, у нас много пользователей в сельскохозяйственной отрасли, в пищевой промышленности. Им мы предлагаем оборудование не только для лабораторного взвешивания, но и для влагометрии. Уральский научно-исследовательский институт метрологии (УНИИМ) разработал ряд стандартизированных методик выполнения измерений для наших влагомеров в различных областях – для зерновых, молочных продуктов, круп и др. Разработаны методики и для других отраслей, например для угольной промышленности.

Среди приоритетных направлений нашего развития – химическая промышленность, где мы пока представлены средне. И конечно, одна из самых важных для нас отраслей – фармацевтика. Нельзя сказать, что в этой сфере Sartorius занимает лидирующие позиции, но мы работаем очень активно. Например, для весов Cubis II разработан специальный пакет приложений Pharma, его главная задача – обеспечить защиту и достоверность данных. Фармацевтическая отрасль во всем мире – и в первую очередь в США и Европе – самая зарегулированная. Здесь предъявляют очень строгие требования к надежности, достоверности и целостности данных. А Cubis II – единственные в мире весы, которые сами по себе полностью соответствуют этим требованиям, без дополнительных программных решений.

Отмечу, с 2012 года Sartorius выкупила бизнес по производству дозаторов у финской компании Biohit. Эти дозаторы уже достаточно популярны в России, а с 2020 года, в связи с пандемией COVID-19, потребность в них выросла невообразимо. И несмотря на взрывной рост спроса в 2020 году, нам удалось сохранить оговоренные сроки поставки дозаторов и расходников к ним (например, наконечников). Что немаловажно, у нас есть решения для поверки дозаторов, включая специальные модели весов Cubis MPS, а также специализированное программное обеспечение для автоматизации процесса поверки – "СартоКаП".

Sartorius известен как производитель компараторов массы. В чем их особенности?

Компараторы массы, как и весы, – это весоизмерительные приборы. Но, как и следует из названия, они предназначены не для непосредственного измерения массы, а для сравнения двух объектов, близких друг к другу по массе. Конструктивно компараторы – это те же весы, отличающиеся большей разрешающей способностью. В отличие от весов, у них не нормируется абсолютная погрешность измерений, но нормируется воспроизводимость результатов измерений. Действительно, если вы сравниваете две близкие по массе гири, абсолютная погрешность измерений не имеет существенного значения. А вот повторяемость результатов измерения принципиальна.

С помощью компараторов проводят прецизионные измерения массы методом замещения, т.е. подбирая эталонную массу и сравнивая ее с образцом. Однако их основное назначение – передача значений эталона массы, т.е. сравнение двух гирь при поверке или калибровке. Рассмотрим это на примере. Скажем, в торговле используют гири класса M_1. Их поверяют гирями F_2 или F_1. Те в свою очередь поверяются гирями класса E_2. Для их поверки используют гири класса E_1 – это самый высокий класс точности, такие гири поверяются уже вторичными государственными эталонами. Sartorius выпускает компараторы массы для всех этих задач. Кроме того, мы периодически изготавливаем вторичные госэталоны с номинальной массой 1 кг. На всю страну в региональных ЦСМ и метрологических институтах их всего около десятка. А вторичные госэталоны поверяются уже первичным государственным эталоном – это цилиндр из платино-иридиевого сплава, изготовленный в 1889 году. В состав государственного первичного эталона входят две таких гири – национальный прототип килограмма и эталон-свидетель. И от них значение массы на вторичные государственные эталоны передается с помощью нашего вакуумного компаратора массы CCL1007. В свою очередь, национальный прототип килограмма – это копия №12 Международного прототипа килограмма, изготовленного в 1889 году и хранящегося в Международном бюро мер и весов в Севре под Парижем. Тогда изготовили 40 его копий и раздали всем участникам Метрической конвенции. Замечу, что Международное бюро мер и весов также использует наши компараторы массы.

Но ведь уже более двух лет весь мир живет без физического эталона килограмма?

Действительно, с 20 мая 2019 года определение килограмма изменилось. До этого, с 1901 года, килограммом

Компаратор массы CCL1007 с автоматической вакуумной системой загрузки (не требуется снимать вакуум в самом компараторе)

называлась единица массы, равная массе международного прототипа килограмма – цилиндра высотой и диаметром 39 мм из платиново-иридиевого сплава. Более того, из всех единиц системы СИ килограмм оставался единственным определяемым на основе изготовленного эталона, а не мировых констант. Основная проблема прототипа килограмма – несмотря на самое тщательное хранение и деликатное обращение, его масса со временем уменьшается. Поэтому в соответствии с решением XXVI Генеральной конференции по мерам и весам 2018 года килограмм стал определяться на основе зафиксированного численного значения постоянной Планка ($h = 6{,}62607015 \cdot 10^{-34}$ кг·м^2·с$^{-1}$).

Теперь для передачи значения килограмма используют очень сложный инструмент – так называемые весы Киббла, еще их именуют ватт-весами. Они названы в честь их изобретателя, британского физика и метролога Брайана Киббла. Изначально их использовали для уточнения значений постоянной Планка, но в 1999 году два сотрудника Национального института стандартов США, П.Мор и Б.Тэйлор, преложили зафиксировать значение постоянной Планка и определять с помощью весов Киббла значение килограмма.

Суть метода, предложенного Кибблом, выглядит просто. Сначала на весах с электромагнитной компенсацией взвешивается некий образец с массой m. Для этого на катушку индуктивности, помещенную в поле магнита с магнитной индукцией B, подается ток I, такой, что воз-

никающая сила Ампера уравновешивает вес образца. Это можно записать как $L \cdot B \cdot I = mg$, где L – некая условная длина проводника, g – ускорение свободного падения. Затем ток отключают, и эту же катушку начинают перемещать в том же магнитном поле с некоторой скоростью v. В результате в катушке возникает напряжение $U = L \cdot B \cdot v$. Сопоставляя два этих выражения, получаем $mgv = UI$. И в левой, и в правой части произведение имеет размерность мощности, потому весы Киббла изначально и назывались ватт-весами. Поскольку силу тока определяют путем измерения падения напряжения U_m на некоем резисторе R, можно записать

$$m = U \cdot U_m / (R \cdot g \cdot v).$$

Скорость точно определяют лазерным интерферометром (т.е. измеряя разность частот, что возможно с огромной точностью). Осталось измерить значения напряжений и сопротивление. Напряжение определяют путем сопоставления с эталоном напряжения на основе эффекта Джозефсона**: $U_j = f_j \cdot h/2e$, где e – заряд электрона. Сопротивление определяется на основе квантового целочисленного эффекта Холла***: $R_h = h/ve^2$ (v – целое число, фактор заполнения уровней Ландау). Таким образом, массу можно определить на основе выражения вида

$$m = h \cdot C \cdot f_j \cdot f_{jm} /(g \cdot v),$$

где C – некая целая константа, f_j и f_{jm} – частоты Джозефсона при измерении напряжений U и U_m. Таким образом, масса полностью определяется постоянной Планка.

Конечно, реализовать подобный принцип измерений чрезвычайно трудно. Необходим комплекс высокоточных измерительных приборов – гравитометр для определения g, интерферометры для определения скорости, эффект Джозефсона и квантовый эффект Холла проявляются при температурах порядка 4 К, для них нужны специальные эталоны и т.д. Как следствие, весы Киббла – очень сложный инструмент. Его нельзя купить, можно только построить. Подобные инструменты есть лишь в нескольких центрах во всем мире. Sartorius вовлечен в ряд подобных проектов. Наши весоизмерительные ячейки используются, например, в проекте Китайского национального института метрологии NIM, в проекте Бюро мер и весов во Франции, а также в проекте Немецкого института метрологии (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) по созданию коммерческих весов Киббла. Работы над новым эталоном массы ведутся и в России. ВНИИМ им. Д.И.Менделеева намерен построить прототип собственных весов Киббла к 2025 году, мы готовы участвовать в этом проекте.

Получается, новое определение единицы массы радикально меняет всю метрологическую цепочку? Как быть обычным пользователям?

Действительно, отказ от прототипа килограмма в качестве эталона переворачивает схему передачи единицы массы с ног на голову. Если раньше гири передавали единицу массы весам, то сейчас весы будут передавать единицу гирям. Но это касается только высшего уровня, национальных эталонов. На последующих этапах схема передачи единицы массы останется неизменной, по крайней мере на ближайшие десятилетия. Так что ни гири не уйдут из оборота, ни новая калибровка весов не потребуется. Для конечных пользователей ничего не изменится.

В описании типа средства измерений весов Sartorius, равно как и в технической документации на российском сайте, указаны несколько противоречащие друг другу данные, например действительная цена деления 0,1 мкг и предел допускаемого среднеквадратического отклонения 0,25 мкг, но при этом удивительно высокий поверочный интервал 1 мг и, соответственно, пределы допускаемой основной погрешности 0,5 мг. Как объяснить этот очевидный парадокс? Ведь реальное разрешение таких весов никак не может быть на уровне 1 мг?

Это действительно парадокс. И очень большая проблема, связанная с государственным регулированием метрологии массы. При утверждении типа средства измерений в России руководствуются единственным нормативным документом – ГОСТ OIML R 76-1-2011. Он основан на рекомендации Международной организации законодательной метрологии OIML R 76-1 и приме-

** Эффект Джозефсона – протекание тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющего два сверхпроводника. В случае так называемого нестационарного эффекта Джозефсона, когда величина тока через диэлектрик превышает некий порог, на переходе происходит падение напряжения $U_j = f_j h/2e$, т.е. частота генерации и напряжение связаны через мировые константы. На этом принципе построен эталон напряжения.

*** Обычный эффект Холла состоит в том, что если поместить электрический проводник (полупроводник) с током Ix в перпендикулярное ему магнитное поле, то на краях проводника в направлении, перпендикулярном и току, и магнитному полю, возникнет разность потенциалов U_y. Параметр $R_H = U_y/I_x$ называют сопротивлением Холла. В сильных магнитных полях и криогенных температурах проявляется целочисленный квантовый эффект Холла – значения R_H квантуются с шагом $h/e^2 = 25\,812{,}807557(18)$ Ом, а на графике зависимости R_H от напряженности магнитного поля появляются выраженные плато. То есть $R_H = h/ve^2$, где v – коэффициент заполнения уровней Ландау.

няется практически в неизменном виде во всех странах мира. Но применяется по-разному, что связано с особенностями национального законодательства.

В ГОСТ OIML R 76-1-2011 указано, что для весов специального класса точности I (наивысший класс) поверочный интервал e ≤ 1 мг. Казалось бы, все правильно. Но там же есть приписка, что (цитирую) "на практике не имеется возможности провести испытания и поверку весов с e < 1 мг из-за большой неопределенности испытательных нагрузок". Соответственно, предел основной погрешности, определяемый как e/2 (в диапазоне до 50 г), составляет 0,5 мг. Вот и получается, что весы с действительным разрешением от 100 мкг до 100 нг в России и ряде стран СНГ имеют утвержденную погрешность в 0,5 мг. Абсурд.

В Европе или США, например, этот парадокс решается очень просто – там весы в основном калибруют. Производитель изготавливает инструмент с заявленными характеристиками. К нему прилагает инструкцию (аналог нашей методики выполнения измерений) – как пользоваться инструментом, чтобы он обеспечивал заявленные характеристики. А дальше всю ответственность за корректность измерений несет тот, кто их выполняет.

Конечно, в России тоже можно – и нужно – периодически калибровать весы, если вы действительно хотите добиться заявленной точности измерений. Проблема в том, что в ряде направлений, подпадающих под действие Федерального закона "Об обеспечении единства измерений", можно применять лишь средства измерений утвержденного типа, прошедшие поверку. А под действие этого закона подпадает очень много областей – практически все, кроме научной сферы. Соответственно, легитимны только технические параметры, указанные в описании типа данного средства измерений. Вот и получается, что весы с разрешением 0,1 мкг обладают погрешностью до 0,5 мг. И поверка выполняется на соответствие этим параметрам. Что говорит прохождение этой процедуры о точности ваших весов, об их исправности? Абсолютно ничего. Это проблема, и пока она вообще никак не решается.

Почему?

Изменить действующую процедуру можно только на законодательном уровне. Но для этого необходимо как минимум желание всех участников рынка. На мой взгляд, главная проблема в том, что высокоточные измерения – очень маленькая область применения. А остальных 90% пользователей весов существующая система поверки устраивает полностью, она гораздо удобнее калибровки, им просто невыгодны такие изменения. Остается только ждать.

В заключение можете привести наглядный практический пример, когда особенности весов Sartorius дают качественное преимущество?

Казалось бы, весы – это далеко не самый сложный прибор в лаборатории. Однако современные весы позволяют совсем под другим углом посмотреть на привычные вещи, существенно упростить многие процедуры и повысить качество всех работ. Например, представьте, что нужно изготовить раствор стандартного образца с концентрацией 50 мг/л, который затем используется для калибровки какого-либо прибора. Если идти традиционным путем – взять 50 мг и добавить растворитель до 1 л, появляется несколько больших источников погрешности. Во-первых, сама мерная посуда дает погрешность от 1 до 0,1% – на порядки больше погрешности взвешивания. Кроме того, как отмеряют раствор в колбе? Нужно нижний край мениска совместить с отметкой на шкале, при этом взгляд оператора должен быть строго горизонтален. Очевидно, что каждый оператор смотрит на этот уровень чуть по-своему, т.е. всегда есть погрешность считывания. Далее, есть риск потерь при переносе вещества из весовой лодочки в колбу – как бы вы ни промывали эту лодочку, какие-то частицы могут на ней остаться. Наконец, существует и погрешность округления. Например, по методике необходимо взять навеску в 50 мг вещества с точностью до 0,1 мг. Весы показывают, скажем, 50,038 мг. Соответствует требованиям методики? Соответствует. Но эти 38 мкг просто теряются за счет округления.

У нас есть специальная программа для приготовления растворов не по объему, а по массе. В память программы вносятся различные растворители, исходя из их плотности масса пересчитывается в объем. Программа сама определяет необходимую для заданной концентрации массу растворителя и образца. Остается только внести – на весах, в конечную тару – навеску образца и растворителя. В итоге получается стандартный образец с очень точно измеренным значением концентрации, т.е. не 50,0 мг/л, а с точностью до четвертого знака. Используя такой стандартный образец, можно существенно повысить и точность градуировки прибора, и точность проведения самого испытания.

Это просто другой подход, который можно реализовать непосредственно на наших весах. Он существенно упрощает задачу, сокращает риски и повышает точность измерений. Получается, ряд привычных вещей с помощью современных весов Sartorius можно сделать совсем по-другому – проще, быстрее, надежнее.

Спасибо за интересный рассказ.

С В.С.Милокумовым беседовала О.А.Шахнович