

ТОЧНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ¹⁾

А. Шейбе, Берлин

Содержание

Введение

- I. Астрономические сутки
 - a. Земля как астрономическая нормаль времени
 - b. Перенесение времени
 - c. Ошибки в определении времени
 - d. Служба времени
 - II. Измерение времени посредством маятниковых часов
 - a. Общие замечания
 - b. Астрономические маятниковые часы
 - c. Свойства маятниковых часов
 - III. Измерение времени посредством кварцевых часов
 - a. Общие замечания
 - b. Устройство и действие кварцевых часов
 - c. Технические детали устройства кварцевых часов
 - d. Факторы, влияющие на ход кварцевых часов
 - e. Ход кварцевых часов
 - IV. Постоянство хода кварцевых часов и постоянство длительности астрономических суток
- Заключение

Введение

1. Из трех основных единиц абсолютной системы — длины, массы и времени — лишь единицы длины и массы установлены особыми международными соглашениями и сохраняются в виде прототипов, которые как таковые не находятся ни в какой зависимости от каких-либо величин, встречающихся в природе, тогда как в отношении единицы времени до сих пор еще сохранилась традиция принимать за таковую $\frac{1}{86400}$ часть средних солнечных суток. Благодаря этому мы оказываемся вынужденными относить всякое связанное со временем физическое измерение к масштабу времени, определяемому однократным обращением земного шара вокруг своей оси. Этим путем была обойдена необходимость установления независимой от вращения Земли временной нормали, но зато возникло неудобство, заключающееся в том, что даже при точнейших измерениях мы не

¹⁾ Ergebn. d. Exak. Naturwiss., B. XV, 1936. Перевод Н. С. Хлебникова.

можем непосредственно обратиться к какой-либо удобной нормали времени и получаем временной масштаб лишь при посредстве вспомогательного прибора — часов.

То, что до сего времени удовлетворялись таким положением вещей, нельзя считать для кого-либо лестным, так как уже давно известно, что установление для больших промежутков времени астрономической меры времени, воплощенной в движении Земли, может дать лишь приблизительно постоянный прототип единицы времени и связано с исключительными трудностями, а быть может, и вообще недостижимо.

Вообще говоря, в качестве земной меры времени мог бы быть применен любой прибор, который с величайшей точностью повторял бы какой-нибудь периодический процесс. К сожалению, однако, в требовании большой точности повторения кроется очень серьезное затруднение. Как показывает практика, временное течение всякого периодического процесса, начиная с некоторого предела точности измерения, заметным образом зависит от внешних воздействий. В поисках за земной нормалью времени, таким образом, из рассмотрения исключаются все те периодически повторяющиеся процессы, для которых положение границы подверженности внешним воздействиям таково, что эти воздействия дают нарушение равномерности течения во времени (определенного по астрономической временной нормали).

Лишь два прибора, а именно: астрономические маятниковые часы новейшей конструкции и пьезоэлектрические кварцевые часы могут в настоящее время считаться удовлетворяющими тому требованию, что граница подверженности внешним воздействиям совершающихся в них периодических процессов такова, что эти процессы могут быть применены в качестве земной нормали времени.

2. Поставив вопрос о создании земной нормали времени, можно дать себе отчет об объеме и трудности этой задачи, лишь вспомнив, что вопрос о применимости современных маятниковых часов в качестве земной *нормали времени мог быть поставлен лишь в результате многовековой работы лучших и способнейших физиков и конструкторов. Точно так же следует помнить, что этот вопрос о применимости неизбежным образом связан с другим вопросом о неизменности периодического процесса, протекающего в астрономической нормали (вращение Земли). Сравнение земной и астрономической временных нормалей расширяет пределы исследования, выдвигая требование того, чтобы земная нормаль превосходила по точности астрономическую не только на малых, но и на больших промежутках времени. В соответствии со степенью выполнения этого условия земная нормаль даст возможность или лишь отмечать колебания в равномерности вращения Земли, или же будет служить инструментом для изучения возможных постепенных изменений скорости обращения Земли вокруг своей оси. Пользуясь выражением часовщиков, можно сказать, что в первом из упомянутых выше случаев речь идет о „случайных колебаниях

хода", а во втором—о „систематическом изменении хода“ Земли. Этим определяется пригодность движения Земли в качестве временной нормы.

Настоящая статья посвящена в основном вопросам о ходе астрономических маятниковых часов и кварцевых часов и сравнению получаемых с теми и другими результатов. Мы покажем, что на сегодня кварцевые часы Физико-технического института в Берлине¹⁾ обладают лучшим ходом и что лишь они дают возможность исследовать постоянство астрономической временной нормы.

1. Астрономические сутки

а. Земля в качестве астрономической нормы времени

3. Мы привыкли употреблять в качестве основной единицы времени среднюю секунду, принимая ее как нечто, само собой разумеющееся. В действительности же необходимость установления средней секунды, определяемой косвенным путем из движения Земли, возникла вследствие непостоянства продолжительности солнечных суток. Промежуток времени, протекающий между двумя последовательными прохождениями Солнца через меридиан, называемый истинными солнечными сутками, вследствие наклона эклиптики относительно небесного экватора и эллиптической формы земной орбиты изменяется день ото дня. Различия в длительности между истинными солнечными сутками могут достигать 31 мин. Кроме того, вследствие наклона эклиптики к экватору и наклонного положения плоскости орбиты Луны, направление земной оси не оказывается неизменным. Земная ось описывает конус вокруг оси эклиптики (прецессия), совершая один полный оборот за 26 000 лет. Кроме того, на это движение накладывается периодическое эллиптическое движение земной оси (нутация) с главным периодом в 18,5 лет. В результате прецессии линия пересечения плоскостей эклиптики и экватора, определяющая точки весеннего и осеннего равноденствий, поворачивается ежегодно примерно на 50 дуговых секунд, вследствие чего происходит смещение точки весеннего равноденствия. Результатом этого является изменение продолжительности кажущегося обращения Солнца вокруг Земли, почему и принято определять год как промежуток времени, протекающий между двумя истинными весенними равноденствиями, за точки которых принимаются раз навсегда установленные точки на небе неподвижных звезд. Год, определенный по первому способу (смещение точки весеннего равноденствия), называемый тропическим годом, будет короче определенного по второму и называемого сидерическим.

¹⁾ Physikalisch-Technische Reichsanstalt ниже всюду обозначается сокращенно как PTR (*прим. перев.*).

Чтобы при исчислении времени не оказаться в противоречии с существующими в природе временами года, за единицу летоисчисления был принят тропический год, отнесенный к истинным точкам весеннего равноденствия. Этот год посредством введения „среднего солнца“, т. е. такого солнца, которое обходило бы Землю по небесному экватору с постоянной скоростью, был разделен на 365,242198 . . . частей — так называемых средних солнечных суток. Средние солнечные сутки, таким образом, в противоположность истинным солнечным суткам имеют одинаковую продолжительность. Разность между истинными солнечными сутками и средними, которые как таковые не наблюдаемы и являются не более чем фикцией, равняется

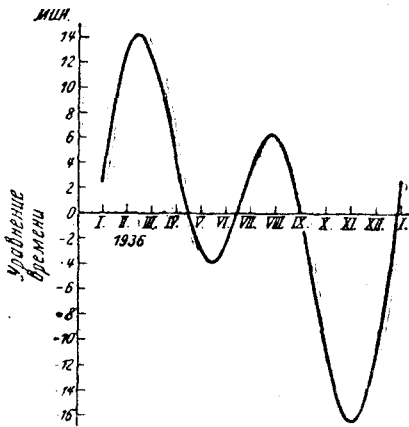


Рис. 1. Кривая уравнения времени

меридиан на соответствующий промежуток времени раньше истинного, т. е. что истинное солнце оказывается на меридиане, например, лишь в $12^h 14^m 23^s$.

4. Средняя секунда, служащая основной единицей времени, представляет собой $\frac{1}{86400}$ часть средних солнечных суток. Сред-

няя секунда представляет собой, таким образом, $\frac{1}{86\,400 \cdot 242\,198} \dots$ часть тропического года. Как таковая она могла бы быть выведена непосредственно из тропического года, если бы существовали часы, которые шли бы совершенно постоянно в течение целого года и которые с достаточной степенью точности могли быть установлены по среднему солнцу в момент истинного весеннего равноденствия.

К сожалению, при современном состоянии техники часового дела непосредственное установление меры времени по тропическому году не представляется возможным. Точно так же не представляется возможным и достаточно точное определение времени по истинным солнечным суткам. Поэтому для целей измерения времени остаются лишь находящиеся в определенном отношении к средним солнечным суткам звездные сутки.

более чем фикцией, равняется „уравнению времени“, величина которого на основании знания сил, определяющих времена обращения, может быть вычислена с достаточной точностью.

На рис. 1 приведен ход этого уравнения времени, построенный по данным Берлинского астрономического ежегодника¹ на 1936 г. Уравнение времени представляет собой промежуток времени, на который истинное Солнце опережает или отстает от „среднего солнца“ при своем прохождении через меридиан. Положительный знак при уравнении времени означает, что среднее солнце проходит через

Звездными сутками называют промежуток времени, протекающий между двумя последовательными прохожденьями через меридиан одной и той же неподвижной звезды. При этом говорят о верхней или нижней кульминации в зависимости от того, совершается ли прохождение через меридиан над полюсом мира или под ним. Звездные сутки и средние солнечные сутки благодаря движению Земли вокруг Солнца отличаются друг от друга на постоянную величину: звездные сутки составляют 86164,0905... средних секунд. При помощи этого переводного коэффициента мы получаем единицу для измерения времени — несмотря на ее происхождение от средних солнечных суток — из наблюдений звезд.

Продолжительность средних солнечных суток, определенную по наблюдению звезд, мы будем в дальнейшем называть астрономическими сутками. Астрономические сутки являются тем масштабом времени, который мы применяем к земным часам для исследования их пригодности.

в. Перенесение времени

5. Одной из самых почетных задач практической астрономии всегда было перенесение астрономических суток на земные часы и сохранение этой астрономической меры для земных измерений времени для возможно более длительного промежутка. В Европе этой задачей занято несколько специально для этой цели предназначенных институтов: Германская морская обсерватория (Н), Потсдамская геодезическая обсерватория (Р), Гриничская обсерватория (G), Парижское международное бюро часов (Pa).

При перенесении времени точками фиксации на небе служат определенные звезды („временные звезды“). Таковыми являются неподвижные звезды, положение которых в результате постоянных наблюдений точно известно и занесено в особые каталоги, издаваемые астрономическими институтами. Такими каталогами являются, например, Третий фундаментальный каталог Берлинского астрономического общества (FK3) или Эйхельбергеровский каталог (ЕК).

В качестве этих временных звезд служат, обычно, лишь неподвижные звезды с верхней кульминацией, прохождение которых через меридиан совершается не слишком далеко к югу или к северу от зенита. Опыт показал, что перенесение времени по звездам с нижней кульминацией, т. е. таких, прохождение которых через меридиан происходит между полюсом и точкой севера горизонта, может быть осуществлено лишь с недостаточной точностью. Германская морская обсерватория² осуществляет выбор звезд для целей перенесения времени таким образом, чтобы среднее место всех наблюдаемых звезд по возможности приходился в зените.

6. Для перенесения времени от временной звезды на регистрирующее приспособление, служащее одновременно для маркирования выверенных часов, служит специальный „пассажный инструмент“. Этот прибор представляет собой зрительную трубу, оптическая ось которой установлена точно в плоскости меридиана соответствующей

щей точки земной поверхности и может поворачиваться вокруг горизонтальной оси. Эта ось, как это само собой разумеется, должна удовлетворять самым строгим требованиям в отношении жесткости и правильности своего расположения. Расположенная в плоскости изображения вертикально натянутая нить играет роль метки на циферблате часов. Тот момент, в который происходит совпадение нити с движущимся через поле зрения инструмента изображением временной звезды, является моментом времени, фиксируемым этими астрономическими часами. Абсолютное значение этого момента времени называется прямым восхождением соответствующей звезды.

Перенесение момента времени, в который происходит совпадение изображений звезды и нити, и приведение в действие пера, делающего отметку на ленте регистрирующего приспособления (хронографа), наиболее точно осуществляется при посредстве соединенного с пассажным инструментом „безличным“ микрометром Реп-сольда, отмечающим совпадение вертикальной нити, расположенной в плоскости изображения прибора, с изображением звезды, движущимся в этой плоскости. При посредстве этого безличного микрометра сильно понижаются или даже устраняются вовсе личные ошибки наблюдателя, которые при одновременном наблюдении прохождения звезды и приведении в действие (вручную) пера хронографа могут достигать значительной величины.

Перенесение момента времени и приведение в действие пера хронографа осуществляется таким образом, что в течение совмещения изображения звезды с нитью соединенный с микрометрическим винтом барабан с контактными пластинками при посредстве того же микрометрического винта производит через равные промежутки времени замыкания электрической цепи, управляющей хронографом. Этим путем при прохождении лишь одной звезды на ленте хронографа получается столько отметок времени, сколько контактных пластинок имеет барабан. Посредством нахождения среднего из этих отметок устраняются как ошибки, связанные со свойствами всей установки (труба — хронограф), так и ошибки, обусловленные восприятием наблюдателя.

7. В качестве записывающих приспособлений в рассматриваемых устройствах применяются как обычные писцы с остриями, так, частично, и современные скорописцы с вращающимися катушками. На основании опыта работы, имеющегося у автора, можно утверждать, что при современных повышенных требованиях к точности уместно лишь применение писцов второго типа. На этом основании на их свойствах нужно остановиться несколько подробнее, тем более, что при работе с кварцевыми часами лишь они могут быть использованы.

Скорописцы с вращающимися катушками позволяют работать при весьма малом потреблении тока (несколько миллиампер) в пишущей катушке и допускают применение постоянной скорости движения ленты вплоть до 300 мм/сек. Постоянство скорости движения ленты может быть значительно повышено путем связывания

мотора, тянущего ленту, с синхронным мотором, поддерживающим постоянно число оборотов первого. В Физико-техническом институте синхронизирующий переменный ток генерируется самими кварцевыми часами. При надлежащем выборе частоты этого тока можно достигнуть, например, того, что скорость движения ленты хронографа будет составлять в точности 100 мм/сек. В таком случае измеренное в миллиметрах расстояние между двумя отметками на ленте будет соответствовать промежутку времени, протекшему между ними, выраженному в сотых долях секунды. Таким образом при этих условиях измерение с помощью миллиметрового масштаба непосредственно без всяких вычислений даст соответствующий промежуток времени.

Скорописец рассматриваемого типа в состоянии покоя дает на ленте непрерывную черту. В зависимости от направления импульса тока в катушке происходит отклонение пера вправо или влево (если смотреть по направлению движения ленты). Таким образом при применении нескольких электрических цепей различной полярности и с различными токами, с помощью регистрирующего приспособления этого типа можно одновременно производить запись многих явлений и иметь возможность различать отметки, относящиеся к каждому из них.

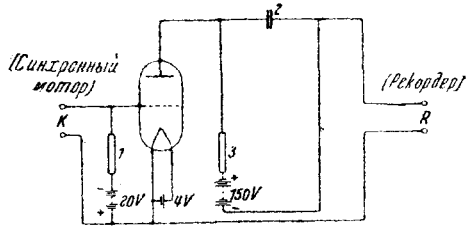


Рис. 2. Электрическая схема записывающего устройства

8. Точность, с которой возможно производить измерения расстояний между отметками на ленте хронографа, зависит от скорости ленты, а также от угла, под которым перо выписывает отметку около нулевой линии. С увеличением скорости движения ленты точность возрастает до тех пор, пока упомянутый угол не сильно отличается от 90° . При больших скоростях это, однако, уже не имеет места, если только импульсам тока, приводящим в движение катушку с пером, не придана такая форма, что катушка даже и в этом случае (при больших скоростях движения ленты) вылетает из своего положения покоя как можно более резко.

Эти меры были приняты Шейбе и Адельсбергером³ при определении времени с помощью кварцевых часов, при приеме сигналов времени, а также при определении разности частот синхронного мотора и кварцевых часов. Способ состоял в том, что (рис. 2) подлежащее регистрации явление, например сигнал времени, снимает заряд с сетки усилительной лампы, в результате чего включенный в анодной цепи конденсатор разряжается через катушку, приводящую в движение перо. Ввиду малости времени разряда можно, не опасаясь повреждения катушки, выбрать напряжение на конденсаторе и его емкость настолько большими, чтобы разрядный ток во много раз превосходил ток, допустимый для длительного

прохождения сквозь катушку. В результате даже при больших скоростях движения ленты получается резкий отход пера от нулевой линии.

Этим путем можно достигнуть того, что даже при скорости ленты в 100 мм/сек и применении стеклянного миллиметрового масштаба ошибка в измерении отрезка не превышает 0,1 мм, что соответствует ошибке в определении промежутка времени не свыше 0,001 сек.

Если имеется потребность в еще большей точности, то с успехом может быть применен шлейф-осциллограф.

с. Ошибки в определении времени при применении пассажного инструмента

9. Момент времени, получаемый в результате отметки сигнала на ленте хронографа, само собой разумеется, нельзя полагать совпадающим с тем, в который звезда в действительности находилась в меридиональной плоскости оптической оси трубы пассажного инструмента. Разность между истинным и отмеченным моментами времени является ошибкой в определении времени. Эта результирующая ошибка складывается из многочисленных частных, главными из которых являются: 1) ошибки, обусловленные рефракцией, возникающей в результате отклонения идущего от звезды луча в верхних слоях атмосферы, а также вследствие местных отклонений в нижних слоях; 2) ошибки в установке зрительной трубы и ошибки, вызываемые инерцией регистрирующего приспособления; 3) ошибки, обусловленные личными свойствами наблюдателя.

10. Ошибки, вызываемые рефракцией, поскольку они обусловлены слоистым строением атмосферы, не могут быть устранены даже при всем желании наблюдателя. Они, быть может, могут быть оценены на основании метеорологических данных. Теоретически, согласно данным Шютте⁴, эти ошибки при полном наклоне слоев на протяжении всей толщи атмосферы, составляющем 1° в зените, в худшем случае приводят к смещению момента времени на 0,07 сек. (это, однако, должно являться редко встречающимся крайним случаем). Помехи, вызываемые преломлениями местного характера, например, обусловленные нагретыми частями зданий, мимо которых проходит продолжение оптической оси трубы, гораздо труднее поддаются оценке. При посредстве хороших часов они могут быть, однако, определены экспериментально. Подобный случай был исследован Фрейслебеном и Ланге⁵ на Германской морской обсерватории, новое здание которой расположено весьма близко от меридиональной плоскости пассажного инструмента. Они установили, что систематические расхождения между передаваемыми в Гамбург сигнальными импульсами тока от кварцевых часов III, изготовленных PTR, и определениями звездного времени, обусловлены рефракцией, вызываемой этим новым зданием, причем эти явления особенно сильно сказывались после жарких солнечных дней

и в душные летние вечера. Отклонения достигали 0,015 сек. Надежное устранение этих и подобных им атмосферных помех возможно лишь путем установки пассажного инструмента на возвышенности, в местности, имеющей степной характер и обладающей умеренной температурой.

11. Более благоприятно складываются обстоятельства в отношении устранения ошибок, обусловленных свойствами самого прибора. Несовпадение оси зрительной трубы пассажного инструмента с плоскостью меридиана, неодинаковость цапф горизонтальной оси вращения трубы и т. д. — эти факторы в значительной мере могут быть проконтролированы, и вызываемые ими ошибки могут быть устранены принятием определенных мер при наблюдениях. Подобным же образом могут быть изучены ошибки, вызываемые безличным микрометром и регистрирующим приспособлением. В дальнейшем они могут быть устранены из результата путем надлежащих вычислений.

12. Менее просто обстоит дело с устранением ошибок, вводимых самим наблюдателем при засекании звезды и определяемых физическими и психическими свойствами и состоянием наблюдателя. Эти ошибки, которые мы назвали личными ошибками наблюдателя, были подробно исследованы Стойко⁶ и другими. Личные ошибки достигают величины нескольких сотых секунды и весьма сильно разнятся у разных наблюдателей, меняясь к тому же со временем. Репсольд² в связи с международным измерением долгот в 1933 г. произвел при посредстве кварцевых часов III сравнительное исследование личных ошибок трех наблюдателей. Он нашел, что различия в определении моментов времени двумя наблюдателями могут достигать нескольких сотых секунды.

13. Для того чтобы суммарная ошибка, слагающаяся из перечисленных, была мала, для определения момента времени пользуются не одной звездой, но несколькими, причем для каждой из звезд при помощи безличного микрометра наносится по несколько отметок. На Германской морской обсерватории обычно пользуются десятью звездами при двадцати отметках на каждую. Средняя ошибка в определении момента времени при этих условиях составляет около $\pm 0,02$ сек.

Помимо этой средней ошибки, в определении момента времени возможно еще появление систематических ошибок неизвестного происхождения. Величина их может быть определена лишь при условии, что определение моментов времени производится одновременно двумя пассажными инструментами. Эти систематические ошибки, определяемые по разности показаний двух различных приборов, могут согласно вычислениям Шютте достигать 0,1 сек. Эти ошибки могут быть частично личные, частично инструментальные, и их существование указывает по меньшей мере на то, что при обсуждении вопросов проверки времени астрономическими методами к данным, получаемым путем наблюдения звезд, следует относиться с осторожностью.

14. В настоящее время еще не является целесообразным изо дня

в день контролировать при помощи кварцевых часов астрономический масштаб времени. То, что было бы этим путем найдено, представило бы собой не более чем экспериментальные ошибки самого измерения и никак не ошибки масштаба. Исключительное постоянство хода кварцевых часов в интервалах суточной продолжительности позволяет отмечать момент времени с точностью до нескольких десятитысячных долей секунды⁷. Эта высокая точность определения времени с помощью кварцевых часов сможет быть использована лишь при условии, что ошибка в определении времени по звездам будет примерно в 100 раз меньше имеющихся сейчас 0,02 сек. Таким образом необходимость в поисках путей и средств уменьшения ошибки в определении времени астрономическим путем является настоящей.

Как уже указывалось, для устранения атмосферных помех необходимо устанавливать пассажные инструменты в подходящих местах. С другой стороны, для избежания личных ошибок необходима замена безличного микрометра соответствующим объективным воспринимающим приспособлением. Попытки построения таких приспособлений, работающих с помощью фотоэлементов, имели место¹⁾. Здесь, однако, не следует забывать о серьезных трудностях, возникающих в связи с фиксацией прохождения звездного диска.

d. Служба времени

15. Климат Средней Европы допускает проведение в течение месяца лишь небольшого числа определений времени. Поздней осенью после одного определения времени свободно может пройти две недели, прежде чем безоблачное ночное небо снова даст возможность произвести измерения. В течение этих промежутков институты службы времени должны указывать верное время на основании показаний часов. От качества этих часов зависит степень точности, с которой на основании предварительно выведенной (по данным определения моментов времени) формулы их хода будет указываться время.

Для нас сейчас достаточно знать, что существует возможность более или менее неточной экстраполяции времени. В связи с этим институты службы времени стоят перед задачей с большей или меньшей точностью сделать всеобщим достоянием полученную при помощи наблюдения звезд меру времени. Это осуществляется при помощи так называемых сигналов времени, передаваемых некоторыми крупнейшими радиопередающими станциями. Сигналы времени, предусмотренные первоначально для нужд мореплавателей — для определения положения судов — приобрели при измерении времени гораздо более широкое значение, так как во многих случаях требования к точности времени вызывают необходимость постоянного контроля имеющихся часов.

¹⁾ Об этом см., например, в книге Симона и Зурмана⁴⁵ (прим. перев.)

16. Основными радиостанциями в Средней Европе, передающими сигналы точного времени, являются следующие: Науэн (длина волны 18 130 м, моменты времени 1^h00^m и 13^h00^m), Бордо (длина волны 19 100 м, моменты времени 9^h06^m и 21^h06^m), Рэгби (длина волны 18 740 м, моменты времени 11^h00^m и 19^h00^m). Эти радиостанции передают среднеевропейское время (MEZ — *mitteleuropische Zeit*)¹.

В Германии служба времени осуществляется главным образом Германской морской обсерваторией в Гамбурге. Совместно с этой обсерваторией работает Геодезический институт в Потсдаме. Германская морская обсерватория передает по кабелю в Науэн главный сигнал с примыкающими к нему добавочными (форма сигнала показана на рис. 3). Главный сигнал начинается в $0^h55^m00^s$ и соответственно в $12^h55^m00^s$ (среднеевропейского времени). Он начинается чертой, играющей роль позывного сигнала, и оканчивается в $1^h00^m00^s$ или соответственно в $13^h00^m00^s$, с окончанием третьей черточки третьего трехчерточного сигнала. На 30,5 сек. позже начинается дльщийся до $1^h06^m00^s$ или соответственно до



Рис. 3. Схема науэнского сигнала времени

$13^h06^m00^s$ добавочный сигнал, состоящий из ряда черточек. Эти черточки делят промежуток времени в 60 сек. на 61 часть, так что от начала одной черточки до начала следующей протекает 0,98361 сек. Каждая черточка, заканчивающая минуту, для удобства ориентировки имеет несколько большую длину, чем другие. Для многих измерительных целей достаточно пользоваться добавочным сигналом как временным масштабом с нониусом, имеющим деления в $\frac{1}{60}$.

Пуск в ход сигнального аппарата, издающего главный сигнал, производится на Германской морской обсерватории при помощи маятниковых часов (сигнальные часы)⁸. Сигнальный аппарат, издающий добавочный сигнал, связан с аппаратом для главного сигнала.

Начала и концы передаваемых радиостанций сигналов времени лишь в самых редких случаях дают истинное время. Обычно же здесь имеют место ошибки, слагающиеся из ошибок передающего механизма — от сигнальных часов до антенны — и ошибок, связанных с сигнальными часами.

⁴ В СССР служба времени осуществляется Московской обсерваторией при Астрономическом институте им. Штернберга; передача сигналов времени производится в 12^h00^m и 18^h00^m через радиостанцию им. Коминтерна (прим. перев.).

17. Ввиду этого сигналы времени принимаются самими институтами службы времени и сравниваются с имеющимися в их распоряжении шкалами времени. В случае наличия расхождения между сигналами и шкалой это расхождение измеряется и публикуется как поправка с указанием знака ее. Эти поправки, однако, публикуются в большинстве случаев с многомесячным опозданием, так как вследствие ненадежности шкалы времени, даваемой маятниковыми часами, для проверки правильности поправок необходимо прибегать к наблюдению звезд уже после передачи сигнала.

Поправки указывают те отрезки времени, на которые должен быть исправлен сигнал времени для того, чтобы он совпадал с соответствующим моментом истинного времени. При этом поправка ни в коем случае не относится ко всему сигналу в целом. Она касается лишь одной определенной черточки сигнала. Так например, для науэнского добавочного сигнала знак плюс, относящийся к началу первого минутного сигнала, означает, что он начался слишком рано, а знак минус — что слишком поздно.

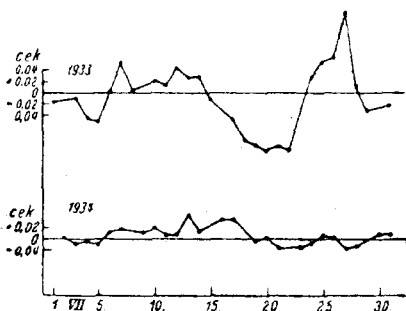


Рис. 4. Колебания науэнского сигнала времени до и после присоединения Германской морской обсерватории к кварцевым часам III

Поправки, даваемые различными институтами службы времени для сигналов времени, представляют собой меру правильности данного сигнала. В то же время они являются критерием для проверки совершенства несения службы времени соответствующим институтом,

а также качества имеющейся в его распоряжении временной шкалы. За последние годы институты службы времени¹⁰ приложили значительные усилия к уменьшению величины поправок. Для этого, с одной стороны, были усовершенствованы сигнальные аппараты, с другой, уменьшены неточности временных шкал. Согласно Фрейслебену и Репсольду среднее значение поправки для науэнских сигналов времени составляло в 1930 г. от 0,05 до 0,08 сек. (не учитывая грубые ошибки), причем колебания со дня на день составляли также почти 0,05 сек., тогда как 1931 и 1932 гг. средняя поправка оказалась уже 0,04 сек. при колебаниях со дня на день в 0,03 сек. За это время Германская морская обсерватория осуществила также присоединение к кварцевым часам III PTR, чем уменьшила ошибки в своих сигналах времени. Это можно видеть из кривых рис. 4, где нанесены поправки для первой минутной черты науэнского дополнительного сигнала $13^h 01^m 00^s$ для одного и того же месяца (июля) до присоединения к кварцевым часам (1933 г.) и после (1934 г.). Согласно этим данным средняя ошибка в 1934 г. оказывается не выше $\pm 0,02$ сек.

Техническая возможность дальнейшего снижения ошибок в сигналах времени простыми способами является сомнительной. Сомнительно также, чтобы из этого снижения можно было извлечь особенно большую пользу. Более полезным было бы нахождение средств для уменьшения ошибок в самих поправках и сокращение промежутка времени, протекающего между сигналом времени и опубликованием поправок.

18. В том случае, если бы временные шкалы различных институтов службы времени совпадали и можно было бы пренебречь ошибками в приеме сигналов времени, то все институты службы времени нашли бы для одного и того же сигнала одинаковые значения поправок. В действительности же и сейчас еще данные различных институтов показывают значительные расхождения в оценке величины поправок.

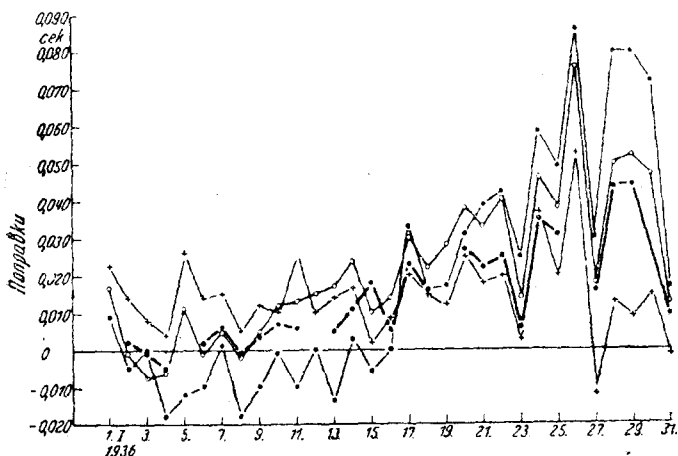


Рис. 5. Поправки к науэнскому сигналу времени, передаваемому в $13^h 01^m$ по данным Потсдама (о.о.), Гамбурга (+++), Парижа (.-.-), кварцевых часов III (о.—о.).

На рис. 5 изображены кривые поправок для науэнского добавочного сигнала в $13^h 01^m 00^s$, полученные в Гамбурге (+++), Потсдаме (о.о.) и Париже (.-.-) для одного месяца 1936 г. На рис. 6 приведены такие же кривые для сигналов времени, передаваемых обсерваторией в Рэгби. Из этих рисунков видно, что обе обсерватории дают в общем и целом одинаковой величины ежедневные колебания и одинаковые отклонения от истинного времени. Таким образом обе эти станции службы времени одинаково совершенны. Различие между ними заключается только в том, что Науэн в конце месяца дает большие колебания отклонений. Это должно быть приписано помехам, возникающим в системе сигнальный аппарат — радиопередатчик.

В оценке ошибок одних и тех же сигналов времени данные различных институтов значительно расходятся. Бросающимся в глаза

является, например, увеличение расхождения между Гамбургом и Парижем в отношении науэнского сигнала при переходе от 10/1 к 11/1 1936 г. (рис. 5). В это же самое время оба института дают приблизительное совпадение в оценке изменения ошибки сигнала Рэгби (рис. 6). Чрезвычайно сильно различаются между собой поправки к сигналу Рэгби, даваемые за 7 — 8/1 Потсдамом и Парижем. Особенно же обращает на себя внимание расхождение между Гамбургом, с одной стороны, и Потсдамом и Парижем, с другой, в отношении сигналов и Науэна и Рэгби, начинающееся с 23/1. Это, вероятно, должно быть отнесено за счет изменения инерционности регистрации^{9, 31} приемной аппаратуры в Гамбурге. Тогда как за 23/1 все три института дают поправки, отличающиеся друг от

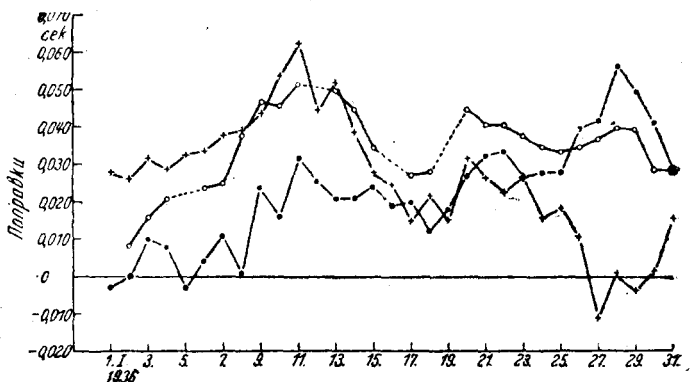


Рис. 6. Поправки к сигналу времени Рэгби, передаваемому в 11^h 00^m по данным Потсдама (•••), Гамбурга (+ + +), Парижа (...).

друга в пределах $\pm 0,01$ сек., за 29/1 расхождение доходит уже (по Науэну) до $\pm 0,035$ сек. Это означает, что вычисление хода часов между 1/1 и 29/1 будет отличаться за сутки на 0,002 сек. в зависимости от того, проведено ли это вычисление по Гамбургу или по Парижу.

Легко установить, который из институтов дает неверное значение поправки. Величина поправки, найденная при помощи кварцевых часов III PTR, показывает, что Германская морская обсерватория, начиная с 24/1, давала слишком малые значения этой поправки. Данные Геодезического института в Потсдаме, также имеющего в своем распоряжении кварцевые часы, в общем совпадают с данными кварцевых часов III.

Из рассмотренного примера становится понятной желательность лучшего совпадения значений поправок, даваемых различными институтами службы времени. В самом деле, изменения в значениях поправок изо дня в день на 0,01 сек. допускают определение верности хода в пределах 24 час. лишь с ошибкой такой же величины. Эта же величина значительно превосходит действительные суточные колебания хода кварцевых часов, а также и часов Шортта.

19. Ввиду всего изложенного, в настоящее время для точной проверки хода часов по поправкам, даваемым институтами службы времени, существует лишь один способ. Этот способ состоит в вычислении по данным нескольких институтов среднего астрономического времени и определении правильности хода по этому среднему астрономическому времени. По отклонениям значений, даваемых отдельными институтами от этого среднего, можно определить средние отклонения этих средних астрономических часов и одновременно найти средние ошибки, свойственные различным институтам. Этим путем находится степень точности определений времени, произведенных как по средним часам, так и отдельными институтами, например, определения точности хода кварцевых часов. В Международном бюро часов в Париже¹⁰ для этой цели пользуются данными девяти институтов.

Н. Стойко,¹¹ работающий в упомянутом бюро, произвел вычисления случайных колебаний хода таких средних часов, а также случайных колебаний хода часов отдельных институтов службы времени, причем ход этих часов устанавливался с учетом поправок. Согласно этим вычислениям среднее случайное ежедневное отклонение средних часов, вычисленных по поправкам четырех институтов, составляет $\pm 0,003$ сек., тогда как для Гамбургского института времени эта величина равна $\pm 0,007$ сек., для Потсдама $\pm 0,010$ сек. и для Парижа $\pm 0,003$ сек.

При сравнении этих результатов бросается в глаза большая разница между Парижем и немецкими институтами. Эта разница, однако, в настоящее время относится уже лишь к области истории, как это без всяких вычислений можно усмотреть из рис. 5 и 6. Материалы для указанных вычислений Стойко относятся к 1933 г. Согласно измерениям Шейбе и Адельсбергера⁷ в 1934—1935 гг. для всех трех упомянутых институтов среднее месячное колебание хода относительно средних часов было одинаково и составляло $\pm 0,00068$ сек.

20. Вычисления Стойко производились при допущении отсутствия каких-либо ускользающих от наблюдения систематических изменений хода часов институтов службы времени. Что такие изменения в действительности могут существовать, показывает пример Гамбургского института — конец месячного периода наблюдений, приведенного на рис. 6. Вследствие этого значение среднего случайного ежедневного колебания хода астрономических часов, определенное в $0,003$ сек., при рассмотрении степени точности является лишь условным. Поэтому, если желают не находиться в зависимости от случайных и систематических колебаний хода часов отдельных институтов и от сообщаемых институтами поправок, необходимо выбирать интервалы времени, в которых определяют по сигналам времени, например, ход кварцевых часов, достаточно большими. Шейбе и Адельсбергер пользуются обычно интервалами от 10 до 30 дней.

При интервале в 30 дней, как показали измерения с кварцевыми часами III PTR, можно считать среднюю ошибку хода средних часов,

полученных из данных трех институтов, равной $\pm 0,0009$ сек. Таким образом абсолютно-постоянно идущие часы при проверке их по сигналам времени с интервалом в 30 дней и при использовании поправок трех упомянутых институтов могут быть проверены лишь с точностью до 0,001 сек. Здесь следует отметить, что в этом результате систематические изменения астрономических суток, как они в настоящее время измеряются при помощи кварцевых часов, сказываются лишь в виде их средних колебаний за годичный период. В этом результате содержатся также ошибки, которые делают институты службы времени при приеме сигналов времени, хотя они почти и не сказываются.

Средняя ошибка в 0,0009 сек. может оказаться во много раз меньше истинной за месяц большого колебания длительности астрономических суток (согласно кварцевым часам PTR таким промежутком являлось⁷, например, время с июня 1934 г. по июль 1935 г.).

С другой стороны, вследствие этого сравнение данных различных институтов между собой должно дать слишком малое значение среднего случайного колебания, как это и имело место в вычислениях Стойко.

II. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКОВЫХ ЧАСОВ

а. Общие замечания

21. Для определения времени с наивысшей возможной точностью могут быть применены лишь астрономические маятниковые часы и кварцевые часы. Поэтому другие приборы, служащие для измерения времени, в настоящей статье рассматриваться не будут.

Часы обоих типов при посредстве своих механизмов — маятника в случае маятниковых часов и синхронного мотора в случае часов кварцевых — выделяют промежутки определенной длительности, последовательность которых и образует шкалу времени. Знание длительности этих промежутков времени дает возможность указать момент времени, соответствующий любому желанию, совершающемуся в один из моментов, лежащих внутри шкалы времени, и каким-либо путем регистрируемого одновременно с временными интервалами шкалы. Для удобства ориентировки на шкале времени, астрономические маятниковые часы обычно снабжаются стрелками и циферблатом. Кварцевые часы PTR не имеют никакого подобия стрелок, так как эти последние для измерения времени, вообще говоря, не являются совершенно необходимыми. Ввиду этого последнего обстоятельства мы ниже ни на каких вопросах, связанных со стрелками или другими указательными приспособлениями, останавливаться не будем.

У маятниковых часов длина отделяющего промежутки времени маятника выбирается такой, чтобы интервалы шкалы времени были по возможности близки к 1 сек. В кварцевых часах PTR^{8, 13} син-

хронные моторы в различных образцах часов отделяют промежутки времени длительностью от 1 до 9 сек. При конструировании этих часов не придавалось никакого особого значения тому, чтобы сделать промежутки времени равными 1 сек. или целому кратному этой величины. Это является делом второстепенным, так как прецизионное измерение времени не зависит от величины принятого за единицу временной шкалы промежутка времени. Установление кварцевых часов с возможно большей точностью на односекундный интервал не представляет, однако, в конструктивном отношении каких-либо трудностей.

22. Не представляется возможным технически пустить часы таким образом, чтобы их показания в точности совпадали с показаниями истинных часов, т. е. чтобы, например, в момент истинного времени $13^h00^m00^s$ часы также показывали $13^h00^m00^s$. Разность между истинным временем и показаниями часов считается положительной, когда часы показывают время более раннее, чем истинное, и отрицательной — в обратном случае. Если, например, в момент истинного времени $13^h00^m00^s$ часы показывают $13^h00^m03^s$, эта разность равна —3 сек. Для получения истинного времени эта разность, называемая стоянием часов и обозначаемая через U , должна быть с соответствующим знаком прибавлена к показаниям часов.

Так как интервалы временной шкалы часов никогда не могут быть сделаны совершенно точно совпадающими с единицей времени — секундой, то указанная разность даже для наилучших часов будет изо дня в день меняться. Как говорят, стояние часов смещается. Величина смещения стояния часов за сутки, т. е. за 86 400 сек., называется суточным ходом часов и обозначается буквой g .

$$g = U_2 - U_1,$$

где U_1 и U_2 обозначают стояния часов, соответствующие двум последовательным дням. g имеет положительный знак, когда часы отстают, т. е. когда интервал их временной шкалы больше 1 сек., и отрицательный — когда часы спешат, т. е. когда этот интервал меньше 1 сек. В первом случае маятник или синхронный мотор часов движется слишком медленно, во втором — слишком быстро.

Ни стояние U , ни суточный ход g не являются мерой совершенства часов, так как эти величины никаким образом не ограничивают возможностей их применения. Слишком большие значения U и g в худшем случае делают несколько неудобным пересчет показаний часов на истинное время. Мерой же качества часов являются лишь колебания величины g во времени. Как оказывается, g нельзя, вообще говоря, рассматривать как постоянную величину. В зависимости от конструкции эта величина оказывается функцией различных и самых разнообразных влияний.

Задачей исследования в области измерения времени является нахождение закона, по которому изменяется g . Поскольку воздействия, вызывающие кратковременные изменения g , не могут быть введены в вычисления и, следовательно, не сказываются как систе-

матические влияния, они проявляются в случайных изменениях g . Величины этих случайных ошибок получаются из разностей между наблюдаемым и вычисляемым ходом.

Если изменение хода является функцией одного лишь времени t , то формула хода может быть записана в виде

$$g_t = g_0 + \Delta g t \pm \delta g,$$

где g_0 обозначает начальное значение g , Δg — изменение хода за сутки, а δg — случайное суточное колебание хода, обусловленное неподдающимися контролю влияниями, например ошибками измерений.

Если суточное изменение хода Δg имеет положительный знак, говорят об отставании часов — часы идут медленнее; если же имеет положительный знак — часы спешат.

Приведенная выше формула применима к кварцевым часам. В случае маятниковых часов соотношения оказываются гораздо более сложными.

в. Астрономические маятниковые часы

23. Полупериод колебания маятника маятниковых часов, а вместе с тем и суточный ход астрономических маятниковых часов при бесконечно-малом угле отклонения маятника от положения равновесия, т. е. при условии $\varphi \approx 0$, дается в первом приближении выражением

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{K + s^2 m}{g s m}}, \quad (1)$$

причем

$$l = \frac{K + s^2 m}{s m} = \frac{\rho_0^2 + s^2}{s}$$

есть приведенная длина маятника, s — расстояние между его центром тяжести и осью вращения, K — момент инерции, ρ_0 — радиус инерции относительно центра тяжести и m — полная масса маятника.

При больших значениях угла φ , что и имеет место в реальных часах, полупериод колебания равен не T_0 , но T_φ . Переход от T_φ к T_0 осуществляется при помощи выражения

$$T_\varphi = T_0 \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\varphi}{2} + \frac{9}{64} \sin^4 \frac{\varphi}{2} + \dots \right). \quad (2)$$

Таким образом мы видим, что изменения длины маятника l , угла отклонения φ и ускорения силы тяжести g ведут к изменению хода маятниковых часов. Причины, вызывающие эти изменения, поскольку они касаются ускорения силы тяжести g , нужно искать вне механизма часов. В остальном эти причины могут быть как внешнего, так и внутреннего происхождения. Из внешних факторов играют роль: температура, давление воздуха, влажность его, сотря-

сения, а также геологические и космические силы: из внутренних— импульсы, сообщаемые маятнику механизмом, смазка подшипников и деформации, происходящие в материале маятника и пружины.

Мерами к устранению всех таких влияний и обеспечению постоянства хода являются поэтому или конструктивные мероприятия, имеющие целью путем надлежащей конструкции частей и путем введения компенсирующих приспособлений сделать недейственными причины изменения хода или же измерение влияния этих факторов на изменения хода с тем, чтобы иметь возможность пересчитать наблюдаемый ход на ход при определенном нормальном состоянии.

24. Наиболее простым с экспериментальной точки зрения является устранение влияния изменений атмосферного давления и влажности. Рифлер¹⁴ и Шортт для этой цели помещают: первый— часы целиком, второй— маятник в герметический цилиндр, в котором создается пониженное давление. До какого давления можно откачивать сосуд, содержащий часы, зависит от масла, при помощи которого производится смазка. В случае часов Рифлера, находящихся целиком, со всеми зубчатками и стрелками, в вакууме, по этой причине не уменьшают давление более чем до 650 мм Hg, тогда как для часов Шортта, практически не нуждающихся в смазке, давление может быть не выше 30 мм Hg. Последние часы имеют поэтому перед часами Рифлера то преимущество, что одновременно с уменьшением давления оказывается уменьшенным и трение. Следуя Шортту, Шулер¹⁵ сконструировал маятник (маятник Шулера), качающийся в медном цилиндре, давление в котором составляет 100 мм Hg.

25. С экспериментальной стороны поддержание в течение длительного времени низкого давления (30 мм и ниже) в большого объема сосуде, как это, например, необходимо для маятника Шортта, представляет довольно значительные трудности. Следствием этого является то, что в часах Шортта, как установленных на Гриничской обсерватории, так и имеющих в Парижском институте времени, происходят изменения давления, вызываемые недостаточным уплотнением. Джексон и Боуэр¹⁶ произвели подробнейшие исследования зависимости изменения хода часов Шортта от изменений давления. Они нашли, например, что при понижении давления на 9 мм Hg (с 34 до 25 мм Hg) происходит уменьшение суточного хода часов на 0,06 сек. Дальнейшее понижение давления (с 27 до 10 мм Hg) дает уменьшение хода только на 0,04 сек. Таким образом ход часов не меняется в какой-либо простой зависимости от давления воздуха. Этот результат следует объяснить тем, что уменьшение давления действует одновременно двояким образом: уменьшая трение и увеличивая амплитуду колебания, причем оба эффекта сказываются на ходе противоположным образом.

В результате своих исследований Джексон и Боуэр¹⁷ получили зависимость суточного хода часов от давления воздуха. На рис. 7 приведена кривая, выражающая эту зависимость. Что касается амплитуды колебания, она изменяется с изменением давления почти

линейно; изменение же суточного хода имеет минимум и оказывается равным нулю при давлении около 19 мм Hg (0,74 дюйма ртутного столба). Согласно Джексону и Боуэру при этом значении давления влияние изменений затухания и амплитуды колебаний на ход часов компенсируют друг друга. Поэтому на практике желательно, чтобы часы Шортта работали при давлении в 15—20 мм Hg; в этих условиях на их ходе не будут сказываться небольшие колебания давления.

26. Изменение температуры в кожухе часов приводит к изменению их хода вследствие изменения длины маятника. Наиболее радикальным средством борьбы с влиянием температурных изменений является помещение часов в термостат, поддерживаемый при постоянной температуре. Вследствие больших размеров часов в направлении маятника, поддержание постоянства температуры, которая, очевидно, должна иметь одно и то же значение по всей длине маятника, оказывается делом нелегким. Это обстоятельство является причиной того, что до настоящего времени мероприятия по поддержанию постоянства температуры маятника астрономических часов ограничивались помещением их в специальные погреба, которые сами по себе представляют помещения с постоянной температурой.

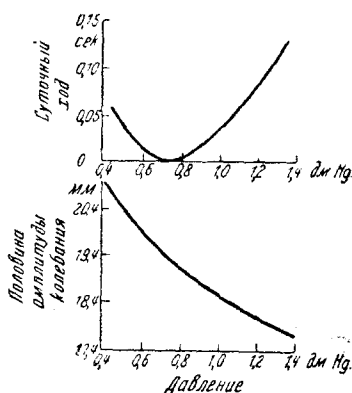


Рис. 7. Влияние изменений давления на амплитуду маятника и ход часов Шортта № 3

Для устранения влияния температуры пытались также применить для изготовления маятников материалы, обладающие низкими значениями коэффициента расширения, и строить маятник из материалов, обладающих различными коэффициентами расширения. Последнее имело целью (применяется, например, в часах Рифлера) компенсацию температурных изменений. Шортт, Шулер, а также и Рифлер применяли в качестве материала для маятников инвар, сплав, замечательный своим малым коэффициентом расширения. Джексон и Боуэр¹⁶ исследовали часы Шортта с маятником из инвара и нашли, что изменение суточного хода их заставляет 0,006 сек. при изменении температуры на 1°С, что соответствует изменению стояния часов на 1,1 сек. в год. На основании опыта применения термостатов для кварцевых часов PTR следует считать возможным сконструировать и для маятниковых часов такие термостаты, которые позволяли бы при столь низких температурных коэффициентах хода, как указанный выше, устранить всякие температурные влияния.

27. В настоящее время влияние колебаний температуры исключают, производя пересчет (приведение) наблюдаемого хода часов при посредстве экспериментально установленного температурного коэффициента. При этом обнаруживается, что приведенный ход часов

не остается изо дня в день постоянным, как этого следовало бы ожидать, но что он подвержен изменениям, которые соответствуют непрерывному удлинению маятника. Шулер¹⁸ подробно исследовал это явление на инваровом маятнике своих часов и на основе своих измерений, а также аналогичных явлений, наблюдающихся у часов Шортта и Рифлера, пришел к заключению, что с температурными колебаниями связано необратимое удлинение маятника. Влияние этого необратимого удлинения на изменение хода часов, конечно, не может быть учтено формулой приведения. Путем точного измерения хода своих часов по кварцевым часам I PTR Шулер показал, что скачкообразные необратимые изменения хода происходят всегда тогда, когда с целью контроля удалялась термическая защита часов. Связанные с этим резкие колебания температуры маятника приводят к изменениям кристаллической структуры инвара. Таким образом оказывается, что, несмотря на низкое значение коэффициента расширения инвара, применение его в качестве материала для астрономических часов, от которых требуется наивысшая точность, оказывается невыгодным вследствие неустойчивости его кристаллической структуры. В настоящее время производятся опыты по применению для маятников вместо инвара стержней из плавленого кварца. Применение кварца (быть может) позволит улучшить качество астрономических часов, так как кварцу свойственны большая однородность, упругость и коэффициент расширения, еще меньший, чем у инвара.

28. Наряду с изменениями структуры материала маятника аналогичные изменения происходят с материалами пружины и ножа, поддерживающих маятник. Эти детали испытывают как постепенные, так и скачкообразные изменения, которые, в среднем, увеличивают длину маятника. В качестве пружины подвеса в часах Шортта и Рифлера служит тонкая пластинообразная пружина. На этой пружине висит тяжелый маятник, и она в течение суток 86 400 раз подвергается гнутю. Совершенно естественно, что эти изгибы при сильном давлении не проходят бесследно для материала пружины, и располагающийся внутри пружины центр вращения маятника смещается. Поэтому автору не кажется обоснованным отказ Шулера от его прежнего взгляда на роль деформации пружины в увеличении длины маятника и объяснение этого явления только лишь на основе предположения об изменениях, происходящих в стержне маятника. Более правильным следует считать допущение, что на изменения хода влияют оба явления.

29. В своей конструкции часов Шулер не применил пружинный подвес маятника, но в противоположность обычному способу снабдил маятник стальным ножом, опирающимся на стальные подушки (А на рис. 9). Несомненно, этим путем устраняется тот фактор неуверенности, который обусловлен гnutием пружины, но вместе с тем вводится возможность износа ножа в результате его длительного трения о подушки. Износ ножа приводит, с одной стороны, к уменьшению его длины, с другой же, к увеличению ширины лезвия. Уменьшение длины ножа связано с увеличением расстояния

s от ножа до центра тяжести маятника, а это согласно формуле (1) вызывает увеличение периода колебания. Шулер обходит это неприятное свойство своей конструкцией, придавая маятнику размер минимального маятника, при каковом условии малые изменения s не могут приводить к изменению хода. Математическим выражением этого условия является равенство приведенной длины маятника l величине p_0 и s ¹⁹:

$$l = \frac{K + s^2 m}{sm} = 2s = 2p_0.$$

Колебания s , которые возникают вследствие изменения ноже при этих условиях, влияния не оказывают. Колебания же s , вызываемые изменением температуры, которые в этом случае только и определяют радиус инерции, в свою очередь определяющие продолжительность колебания, попрежнему играют роль.

Влияние увеличения ширины лезвия на изменение хода, при придании маятнику размеров минимального, не только не уменьшается, но даже увеличивается. О роли этого недостатка в свое время развернулась широкая дискуссия, в которой участвовали Рег сольд²⁰, Шмервиц²¹, Гебелейн²², Генглер¹⁹ и Грэфф²³. Результаты различных работ оказываются сильно противоречивыми, так как авторы основывались на различных исходных положениях. Грэфф пытался разъяснить вопрос экспериментально с помощью маятника Шулера. Путем снятия кривой, выражающей зависимость между амплитудой и периодом колебания, он нашел, что действительно существует изменение радиуса кривизны лезвия, влияние которого не корригируется приданием маятнику размеров минимального. По его данным влияние этого изменения сказывается длительности колебания лишь ничтожно: по истечении трех лет величина отношения $\frac{\Delta T}{T}$ составит лишь $3 \cdot 10^{-8}$. Если эти данные подтвердятся, это будет большим успехом часов Шулера. Этот вопрос может быть решен лишь путем длительных систематических измерений хода.

30. Столь же существенными для постоянства хода, как изменения температуры и длины, являются изменения амплитуды колебаний маятника. Об изменении амплитуды, возникающем под действием изменений давления воздуха, мы уже говорили. Кроме того, амплитуду колебаний оказывают влияние импульсы, сообщаемые маятнику, и сотрясения. Всякие часы для поддержания колебаний маятника нуждаются в сообщении ему энергии. Чем слабее может быть сделана связь между маятником и источником энергии, тем меньше влияния оказывают свойства этого источника и соединительного механизма на длительность колебания, тем свободнее колеблется маятник.

Рифлер воспользовался для этих целей передачей импульса через подвесную пружину. Дальнейший крупный шаг вперед был сделан Феррье и Жуо²⁴, Шорттом и Шулером, которые перенес

все операции, связанные с взаимодействием маятника и механизма, на другие вспомогательные часы и удалили этим путем с главных часов стрелки и зубчатые колеса.

У часов Шортта (рис. 8) вспомогательные часы через каждые 30 сек. освобождают при помощи электромагнита рычаг, который, падая, сообщает через ролик импульс маятнику главных часов. Этот рычаг, связанный во время своего падения в течение одного момента с маятником главных часов, синхронизирует при этом при посредстве другого электромагнита маятник вспомогательных часов и тем создает нужное совпадение фаз.

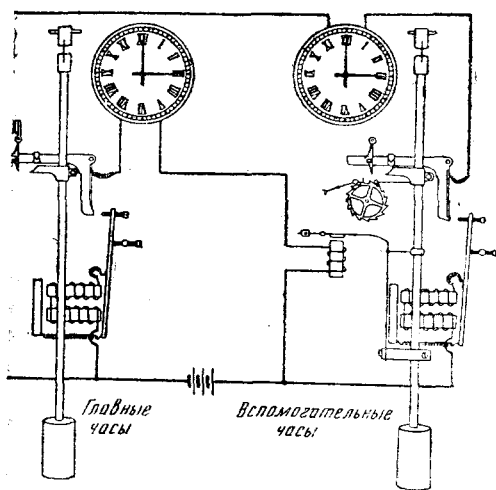


Рис. 8. Схема часов Шортта

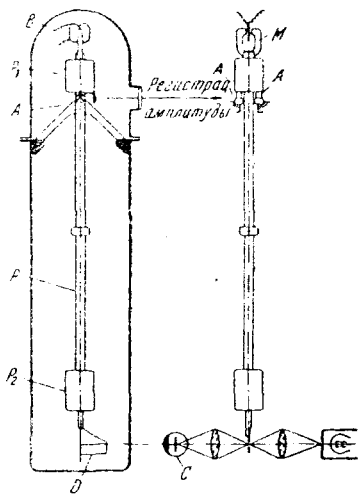


Рис. 9. Схема часов Шулера

Еще несколько более свободным является маятник часов Шулера (рис. 9). Вспомогательные часы электромагнитным путем действуют на магнит М, расположенный в верхней части главного маятника. Синхронизация включений производится главным маятником при посредстве светового пучка. Этим путем Шулер устранил всякие механические воздействия на главный маятник и во всяком случае уничтожил связь между обоими маятниками при синхронизации.

31. Амплитуды колебаний астрономических часов лежат в пределах $2-3^\circ$. Изменение амплитуды на $0,1'$ при амплитуде в 2° приводит к изменению суточного хода на $0,011$ сек., а при амплитуде, равной 3° , — на $0,016$ сек. Джексон и Боуэр¹⁷ показали, что многие колебания стояния часов Шортта, имевшие место в 1927—1929 гг., с несомненностью должны быть приписаны колебаниям амплитуды. Они справедливо указывают, что постоянство суточного хода до $0,0015$ сек. требует постоянства амплитуды примерно до $0,03$ (что соответствует $0,01$ м.м.).

По этим соображениям Шулер производил длительную регистрацию амплитуды и по полученным данным приводил наблюдаемую величину суточного хода часов к постоянной амплитуде. Джексон и Боуэр также в целях пересчета контролируют амплитуду. Эти пересчеты связаны с кропотливыми вычислениями и потому не применимы для определений времени с большой быстротой и точностью, которые во многих случаях необходимы. Лумис²⁵ для обхода этого затруднения усовершенствовал часы Шортта, введя особый контакт, который автоматически ограничивает превышение определенной, наперед заданной амплитуды, производя выключение подающего энергию устройства, как только амплитуда превысит более чем на 0,0025 мм установленную величину.

Грэфф²³ показал, что значительные колебания амплитуды в часах Шулера происходят от недостаточного постоянства воздействующего на магнит тока. Путем стабилизации напряжения, питающего электромагнит с точностью до 0,002—0,003 V, ему удалось понизить колебания амплитуды до величины порядка нескольких дуговых секунд.

32. Изменения амплитуды в результате сотрясений, вызываемых обычными в городах колебаниями почвы или же сейсмическими факторами, столь же неприятны, как и вызываемые механизмом часов. Согласно исследованиям Гебелейна²⁶ не все вызываемые сотрясения помехи могут быть установлены путем регистрации амплитуды, так что введение последующего пересчета оказывается невозможным.

Рикман²⁷ указывает на возможность устранения влияния кратковременных, имеющих горизонтальное направление сотрясений путем подвеса главного маятника на особом тяжелом „защитном маятнике“. Для такой системы (при применении математического маятника) существует определенное условие компенсации, заключающееся в том, что центры тяжести обоих маятников должны находиться на одной высоте. Колебания, имеющие вертикальное направление, должны гаситься подвесом защитного маятника.

33. Если имеется возможность надеяться, что влияние сотрясений может быть устранено путем соответствующих конструктивных мероприятий, то рассчитывать на что-либо подобное в отношении устранения влияния изменений ускорения силы тяжести не приходится. Изменения силы тяжести происходят, с одной стороны, вследствие перераспределения масс на Земле, с другой же вызываются изменениями положений Солнца и Луны (приливные силы). Причинами перераспределения масс являются изменения атмосферного давления, перемещение воды в результате испарения и выпадения осадков, сейсмические процессы внутри земного шара и изменения нагрузки земной поверхности вследствие перемещения водяных масс во время приливов и отливов.

Согласно Томашеку²⁸, обычно, относительные изменения ускорения силы тяжести не превышают $\frac{\Delta g}{g} = 10^{-6}$, причем на долю приливных сил, вызываемых Солнцем и Луной, приходится часть, состав-

вляющая примерно 10^{-7} . Сила притяжения Луны, выражаемая так называемым главным лунным членом M_2 , в течение периода в 12,42 часа изменяет ускорение силы тяжести на $\pm 4,3 \cdot 10^{-8}$ его значения. Поэтому, если бы было возможно быстро произвести измерение частоты колебания маятника часов, ее значения в два соответствующие момента оказались бы различающимися на $8,6 \cdot 10^{-8}$. Путем экспериментального сравнения трех экземпляров часов Шортта с кварцевыми часами Мэррисона Лумис²⁹, а также Броун и Броуэр³⁰ действительно обнаружили влияние главного лунного члена на стояние маятниковых часов. Влияние каждого из десяти членов уравнения, выражающего приливные силы, на амплитуду, период и фазу колебания маятника теоретически представляется возможным устранить путем вычисления зависимости стояния часов от приливных сил. Для быстрых и в то же время точных определений времени этот путь, однако, не годится.

Непериодические изменения ускорения силы тяжести, вызываемые перераспределением масс, естественно, не могут быть учтены заранее. Поскольку эти изменения обнаруживаются гравиметрическими измерениями, они могут быть учтены как поправки к ходу часов. Для осуществления этого необходимо, чтобы рядом с часами был установлен регистрирующий гравиметр²⁸.

Независимость от колебаний силы тяжести, которые частью вообще не поддаются контролю, частью же лишь с трудом учитываются, может быть получена лишь при пользовании измерителем времени, временные интервалы которого не зависят от силы тяжести. Таким прибором являются, например, кварцевые часы.

с. Ход маятниковых часов

34. Предыдущее рассмотрение показало, насколько многочисленны и разнообразны факторы, влияющие на ход часов. Для возможности применения кварцевых часов необходимо знать закон, по которому эти факторы оказывают влияние. Если, например, известна функция, выражающая зависимость хода часов от температуры, влияние температуры на результат измерений можно устранить. При этом согласно разделу 22 получается формула, содержащая в правой части член, выражающий зависимость от температуры. Случайные колебания хода, которые можно считать показателем качества часов, будут при этом тем меньше, чем полнее учтено в формуле хода часов влияние всех факторов. Это стремление — как можно лучше установить закономерности изменений хода, чтобы отделить случайные отклонения от систематических и тем сделать их достаточно малыми, — если оно переходит допустимые пределы, приводит к спорным результатам. Всегда лучше тот измеритель времени, который при простой формуле хода дает малые случайные колебания хода, а не тот, который при весьма сложной формуле дает еще меньшие случайные колебания. Кроме того, не безразлично, на протяжении какого промежутка времени определяют случайные

колебания хода. Например, для периода продолжительностью в год двое часов могут иметь одинаковые случайные колебания хода и номинально быть одинакового качества, в действительности имея весьма различный ход. Это будет иметь место тогда, когда для одних из этих часов формула хода состоит из отдельных частей с различными коэффициентами. Вследствие этого всюду в литературе предлагаемый для суждения о часах критерий — среднее случайное колебание хода, вычисленное по случайным колебаниям за промежуток различной продолжительности, — для правильного суждения о часах критерием являться не может.

35. Манкопф и Кинле произвели подробное исследование часов Рифлера. Они нашли в качестве среднего суточного колебания хода $\pm 0,002$ и $0,004$ сек.; это — очень благоприятные результаты. Менее благоприятные данные получил Репсольд². Его результаты для суждения об этих часах имеют большое значение, так как они были получены путем ежедневного сравнения часов Рифлера с кварцевыми часами PTR. Репсольд за промежуток времени с 20 сентября 1933 г. по 31 января 1934 г. для двух часов дает среднее суточное колебание хода в $0,010$ и $0,016$ сек. Эти величины, как видно, на много больше, чем приведенные выше значения, и они ближе соответствуют действительности.

36. Относительно часов Шулера в настоящее время имеется еще слишком мало цифрового материала для того, чтобы иметь возможность серьезно судить об их ходе. Часы Рифлера во всяком случае превосходят часы Шулера.

37. Весьма обширным является материал, касающийся хода часов Шортта. Джексон и Боуэр¹⁶ показали, что для обоих установленных в Гриниче часов Шортта — № 3 и № 11 — формула стояния имеет вид

$$U_t = U_0 + gt + \frac{\Delta g}{2} t^2 + \Delta'g \int (T - T_0) dt + \text{нутаия}$$

и которая позволяет вычислять U_t без изменения коэффициентов для больших промежутков времени. В этой формуле коэффициент $\Delta'g$ учитывает влияние колебаний температуры (T_0 — температура нормального состояния). Дифференцирование этого уравнения по времени t дает формулу хода.

Разности между измеренными и вычисленными по этой формуле значениями стояния для часов Шортта № 11 за 1929 г. приведены на рис. 10. Вычисления для промежутка в 8 мес. (август) дают ошибку в 2 сек., которая сохраняет свою величину в течение нескольких недель и затем вновь уменьшается. В конце 1930 г. разность оказывается имеющей обратный знак и ту же абсолютную величину: она равна — 2 сек. Эти отклонения, получаемые в результате вычислений, указывают на то, что в часах Шортта имеются факторы, влияющие на ход и не учитываемые формулой. Тем не менее следует считать, что качество этих часов Шортта является весьма высоким, так как разность стояний в 4 сек. за период с октября

1929 г. по декабрь 1930 г. можно было бы свести к нулю, изменив коэффициент акселерации Δg квадратичного члена, равный примерно 0,0004 сек., приблизительно на 0,00006 сек. Коэффициент акселерации, т. е. суточный ход часов в 0,0004 сек., по современным требованиям очень велик. Для сравнения можно указать, что для кварцевых часов III PTR он согласно формуле хода за 1934 г. составил лишь 0,00002 сек. Что имеется возможность получить еще лучшие результаты, следует из работы Стойко³², который, для часов Шортта № 44, установленных в Международном бюро часов, за период с мая 1934 г. по апрель 1936 г. нашел чрезвычайно низкий коэффициент акселерации, равный всего лишь 0,0000056 сек.

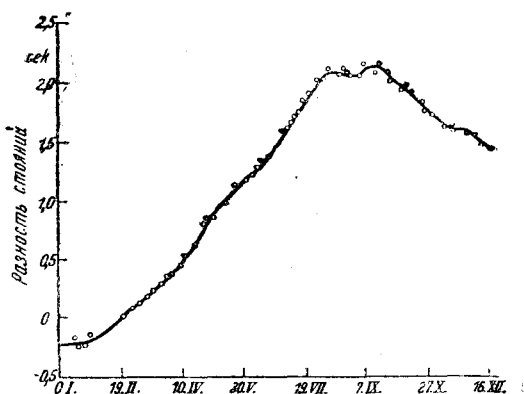


Рис. 10. Разности между измеренными и вычисленными стояниями часов Шортта № 11

Согласно всем имеющимся в настоящее время данным часы Шортта должны быть признаны наилучшими из существующих астрономических маятниковых часов.

III. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ С ПОМОЩЬЮ КВАРЦЕВЫХ ЧАСОВ

а. Общие замечания

38. В 1922 г. У. Д. Кэди опубликовал свои исследования о применении кварцевых стержней в качестве пьезоэлектрических осцилляторов и резонаторов для высоких частот. С тех пор не игравшие до того никакой роли в технике пьезоэлектрические явления оказались весьма плодотворно включенными в область техники высокочастотных колебаний. В настоящее время пьезоэлектрические устройства сделались неизменным вспомогательным средством во всех областях использования колебаний, так как при помощи их возможно не только с удобством возбуждать колебания любых частот, но также и обнаруживать такие колебания. Наиболее существенным научным применением пьезоэлектричества оказались

„кварцевые часы“, при посредстве которых сделалось возможным измерение времени, независимое от маятниковых часов. Даже в том случае, если бы кварцевые часы только не уступали лучшим астрономическим маятниковым часам, то уже на основании того, что их действие основано на совершенно ином принципе, они дали бы возможность получить значительно ббльшую уверенность при решении проблем, связанных с определением времени.

Впервые прямой пьезоэффект был обнаружен Ирен и Пьером Кюри в 1880 г. на турмалине. Как это часто бывает, и в этом случае прошло несколько десятилетий, прежде чем физическое явление нашло себе применение в технике.

Прямой пьезоэлектрический эффект заключается в том, что при сдавливании или растяжении пьезоэлектрического кристалла в определенных направлениях в нем возникают электрические заряды. Обратный пьезоэлектрический эффект проявляется в изменении размеров пьезоэлектрического кристалла в определенных направлениях, происходящем при помещении его в электрическое поле.

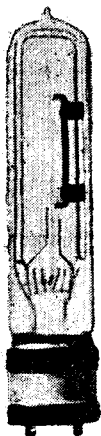


Рис. 11. Светящийся резонатор для 60 000 Hz

Кэди показал, что кварцевые стержни, определенным образом вырезанные из кристалла кварца, при помещении их в высокочастотное переменное электрическое поле начинают совершать упругие колебания в направлении своей длины. Амплитуда этих колебаний достигает наибольшего значения при резонансе, т. е. при равенстве частоты возбуждающих колебаний и частоты собственных колебаний стержня.

39. Е. Гибе и А. Шейбе³⁵ показали, что у кварцевых стержней и колец можно возбудить не только колебания длины, но также и крутильные колебания, связанные с гнутием. Ими был сконструирован так называемый светящийся резонатор, состоявший из кварцевого стержня, помещенного в колбу, наполненную разреженным газом. При резонансе возникающая на стержне разность потенциалов заставляет газ светиться. Исследования постоянства частоты светящегося резонатора показали неизменность частоты до одной миллионной ее значения и ниже. Граница со стороны нижнего предела была, повидимому, установлена не недостаточным постоянством частоты, но невозможностью посредством наблюдения свечения измерить частоту с точностью более нескольких десятимиллионных ее значения. Высокое постоянство частоты было достигнуто тем, что кварцевый стержень, посредством жесткого крепления в двух узловых точках, поддерживался неподвижным между двумя возбуждающими электродами (рис. 11).

40. В противоположность этому американские исследователи в создании кварцевого стабилизатора частоты пошли по другому пути. Уже Кэди была предложена схема включения, содержащая пьезокварц и ламповый усилитель, служившая для генерации незатухающих колебаний с частотой, равной собственной частоте кварцевого

стержня. Д. У. Пирс³⁶ сильно упростил эту схему. Называемая в его честь схема Пирса отличается тем, что пьезокварц включается между сеткой и анодом усилительной лампы, а между ее анодом и катодом включен колебательный контур с подходящим собственным периодом. Частота колебаний в такой схеме определяется, главным образом, собственной частотой управляющего кварца. Но поскольку при присоединении кварцевого стержня к лампе он не остается совершенно свободным, некоторое влияние на частоту оказывают также сама лампа и колебательный контур. Поэтому возникла задача сделать эти влияния настолько малыми, чтобы изменения частоты, вызываемые изменениями в лампе и контуре, стали совершенно ничтожными.

Эта цель была весьма успешно достигнута У. А. Мэррисоном³⁷, который в 1929 г. опубликовал первую работу о кристалльных часах (Cristal Clock), озаглавленную „Высокопрецизионный стандарт частоты“. В качестве управляющего кварца им было применено кварцевое кольцо, определенным образом вырезанное из кристаллического кварца и имевшее определенные размеры¹⁾. Ценное свойство кварцевых колец, заключающееся в слабом затухании продольных колебаний, было в свое время отмечено Гиббе и Шейбе³⁹.

В 1930 г. автором настоящего обзора была поставлена в PTR работа, имевшая целью создание кварцевых часов. Так как предшествовавшие ей исследования показали, что с помощью описанного выше светящегося резонатора можно надеяться получить еще лучшие результаты, чем те, которых добился Мэррисон с кварцевыми кольцами, то при разработке часов для PTR не было никаких оснований следовать пути, которым шел Мэррисон. Поэтому конструкторами кварцевых часов — Шейбе и Адельсбергером³ — управляющий кварц был использован в виде кварцевого стержня. Ими также была применена другая конструкция и другая схема включения, так что кварцевые часы и кристалльные часы не имеют между собой никакого внешнего сходства (рис. 24 и 28).

в. Свойства и действие кварцевых часов

41. По своему устройству кварцевые часы представляют собой генератор переменного тока с наивысшим постоянством частоты, переменный ток от которого питает специальный синхронный мотор. Незатухающие колебания, возбуждаемые генератором, снабженным пьезокварцем, имеют, вообще говоря, слишком высокую частоту (например 60 000 Hz) и слишком малую энергию для того, чтобы они могли непосредственно приводить в действие синхронный мотор. Поэтому возникает необходимость усилить этот переменный ток посредством ламповых усилителей и затем при помощи трансформаторов частоты обратить в переменный ток низкой

1) Этот вопрос был исследован Лаком³⁸.

частоты (например, 250 Hz). В кварцевых часах Шейбе и Адельсбергера понижение частоты происходит от 60 000 Hz к 10 000, далее к 1000 и к 333, 33333... или к 250 Hz.

42. Кварцевые часы, снабженные трансформатором частоты, представляют собой нормаль частоты, при присоединении же синхронного мотора являются масштабом времени. Установление соответствия между ходом кварцевых часов и астрономическим временем происходит при помощи временного контакта синхронного мотора. Из колебаний промежутков времени, протекающих между двумя замыканиями контакта, можно вычислить колебания суточного хода. Сравнение кварцевых часов между собой позволяет произвести определение частот переменных токов, даваемых 10 000 Hz- или 1000 Hz-трансформаторами частоты. При этом сравнении, заключающемся в измерении разности частот двух переменных токов, открываются возможности применения наиболее точных из существующих в технике высоких частот измерительных методов, которые при затрате на измерение нескольких минут позволяют установить изменение частоты порядка 10^{-10} — 10^{-9} измеряемой величины. По изменению разности частот оказывается возможным весьма просто вычислить, насколько изменится суточный ход часов за 24 часа, так как, например, изменение частоты, на 10^{-9} соответствует изменению суточного хода на 0,0001 сек. Определенные этим путем изменения хода кварцевых часов называются Шейбе и Адельсбергером¹³ мгновенными значениями изменений суточного хода. В возможности быстрого, удобного и систематического контроля кварцевых часов по мгновенным значениям суточного хода заключается их большое преимущество перед маятниковыми часами, в случае которых производить такие сравнения за короткие промежутки времени невозможно. Ясно, что при непрерывном наблюдении за ходом нескольких кварцевых часов возможно своевременно обнаружить изменение хода каких-либо из часов и своевременно ввести поправки. Наконец, с этими часами удобно производить изучение влияния различных факторов на ход часов.

43. Значительно менее благоприятным оказывается положение с включением кварцевых часов в течение астрономического времени. Как уже подробно указывалось в разделе 20, средний суточный ход кварцевых часов вследствие ошибок, связанных с дачей сигналов времени, даже при периоде в 30 дней не может быть определен с точностью более чем 0,001 сек. Ввиду этого совершенно не представляется возможным измерять суточный ход изо дня в день с точностью, хотя бы приближающейся к 0,001 сек. Поэтому при определении случайных и истинных суточных колебаний хода, в случае кварцевых часов так же, как и в случае маятниковых, приходилось бы прибегать к помощи весьма спекулятивных вычислений, если бы путем непрерывного измерения мгновенных значений суточных изменений хода в совокупности с данными об абсолютном ходе, полученными при измерениях на очень больших интер-

валах времени, не был собран экспериментальный материал, который позволяет определить абсолютный суточный ход с большой точностью, не пользуясь никакими вычислительными трюками.

с. Технические детали устройства кварцевых часов

Кварцевые часы Шейбе и Адельсбергера³

44. На рис. 12 изображена принципиальная схема включения кварцевых часов, разработанных в PTR. Пьезокварц Q , связанный высокочастотным генератором RS , через два усилителя $V1$ и $V2$

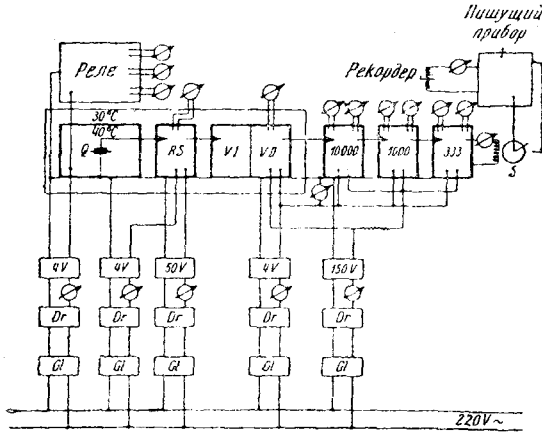


Рис. 12. Принципиальная схема кварцевых часов

и три трансформатора частоты 10 000, 1000 и 333 приводит в движение синхронный мотор S , который при помощи своего временного контакта действует на записывающий аппарат, наносящий

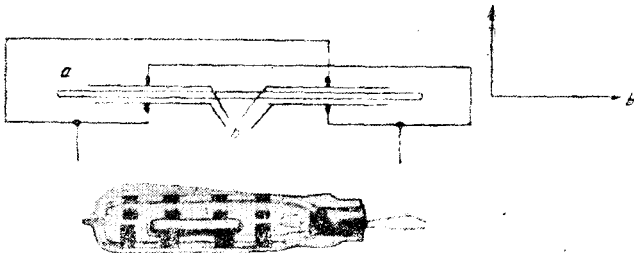


Рис. 13. Расположение электродов и общий вид управляющего кварца кварцевых часов I и II

отметки времени на вращающемся барабане. Подача энергии к часам осуществляется от сети переменного тока через выпрямители, дроссели и буферные батареи.

В PTR установлено четверо часов. Два первых экземпляра — кварцевые часы I и II — снабжены кварцами, совершенно идентич-

ными с показанным на рис. 11 светящимся резонатором для 60 000 Нз. Расположение электродов *b*, ориентация кварцевого стержня *a* относительно электрической *X* и нейтральной *Y* осей кристаллического кварца, а также общий вид всего прибора показаны на рис. 13. Длина стержня равняется 91 мм.

Температурный коэффициент суточного хода кварцевых часов составляет 0,4 сек/1°С. Поэтому требование неизменности суточного хода с точностью до 0,001 сек. вызывает необходимость поддержания постоянства температуры с точностью до 0,002°С. Это осуществлено путем помещения управляющего кварца во внутренний термостат, поперечный разрез, продольный разрез и общий вид которого показаны на рис. 14, 15 и 16, и затем во внешний, представляющий собой деревянный ящик, утепленный пухом. Этот

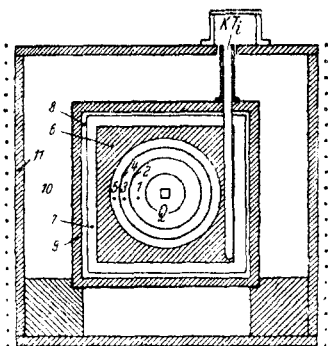


Рис. 14. Поперечный разрез внутреннего термостата

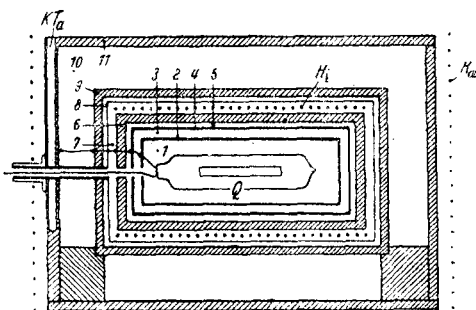


Рис. 15. Продольный разрез внутреннего термостата

термостат можно видеть на рис. 24, справа. Особенно большое значение для поддержания постоянства температуры имеет внутренний термостат, который посредством контактного термометра *KTi* и нагревательной обмотки *H1* поддерживает постоянную температуру в 36°С. Этот термостат состоит из 11 чередующихся хорошо изолирующих и теплопроводящих слоев, показанных на рис. 15: воздух (1), медь (2), воздух (3), медь (4), воздух (5), медь (6), воздух (7), пробка (8), алюминий (9), пух (10), алюминий (11). Внешний термостат, назначением которого является смягчение резких колебаний комнатной температуры, поддерживается при постоянной температуре посредством контактного термометра *KTa*, введенного в слой 11, и внешней нагревательной обмотки *Ha*.

Работа с этими двумя первыми кварцевыми часами дала хорошие результаты, но вместе с тем скоро показала, что необходимо добиться еще большей независимости суточного хода часов от температуры. Ввиду этого последовало построение двух новых часов — кварцевых часов III и IV. Управляющие кварцы этих часов (*a*) расположены относительно электродов (*b*) и осей (*X, Y*) так, как показано на рис. 17, где приведен и общий вид приспособле-

ния. Исследования Гибе и Шейбе³⁵ показали, что при такой ориентации стержней в интервале от 35 до 37°С температурный коэффициент хода становится исчезающе малым при условии, что отношение одной стороны квадратного поперечного сечения к длине упругой полуволны выбрано равным 0,25. При работе этих квар-

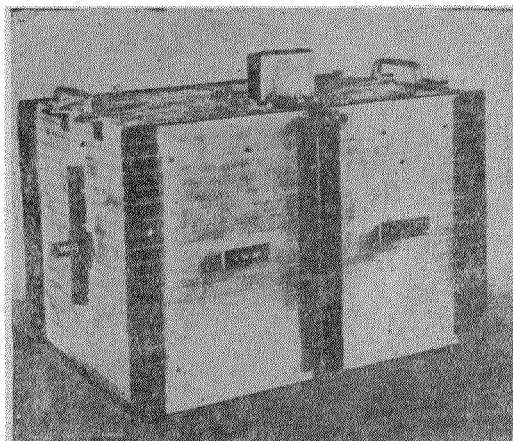


Рис. 16. Внутренний термостат с наружной нагревательной обмоткой на 36°С

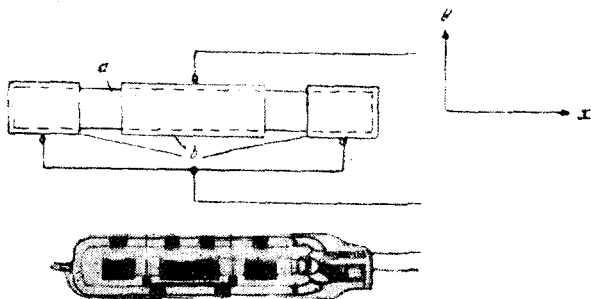


Рис. 17. Расположение электродов и общий вид управляющего кварца кварцевых часов III и IV

цевых часов было установлено, что действительно при температуре термостата в 36°С влияние колебаний температуры становится неизмеримым.

Ввиду этого кварцевые часы типов I и II более не строятся. Мы увидим, однако, что и с этими часами можно получить весьма ценные результаты, если посредством часов III и IV вести систематическое наблюдение за температурными помехами.

45. На рис. 18 приведена детальная схема генератора и усилителя; в пределах настоящего обзора на них, однако, нет необходимости останавливаться. Схема трансформатора частоты показана

на рис. 19. Каждый из трансформаторов состоит в основном из малоомощного лампового генератора с индуктивной обратной связью, сильно связанного с сеточным контуром следующего генератора более низкой частоты. Этим путем достигается то, что каждый из

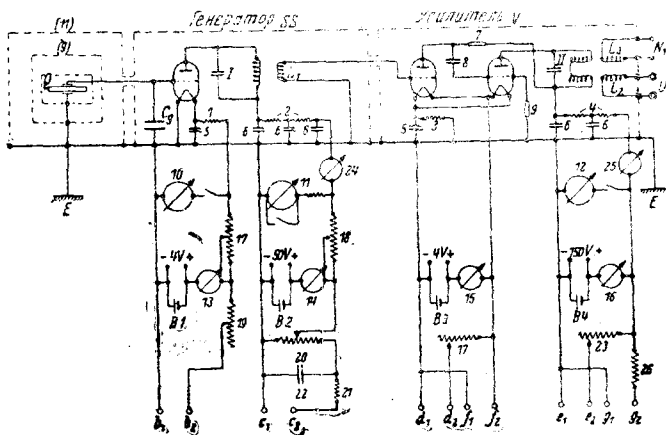


Рис. 18. Схема кварцевых часов (термостат, генератор, усилитель)

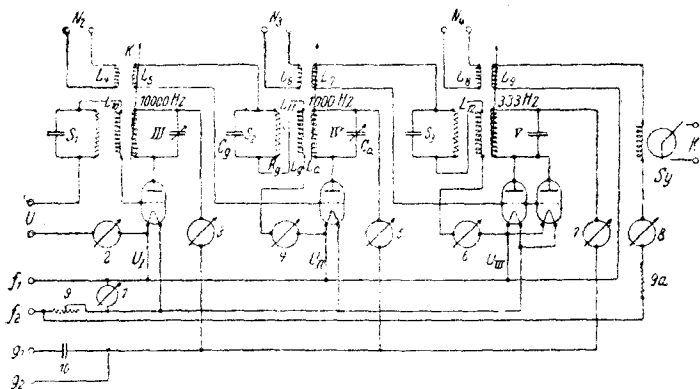


Рис. 19. Схема трансформатора частоты

трех генераторов лишь тогда колеблется свободно, когда их периоды являются целыми кратными периода высокочастотного генератора, который колеблется синхронно с частотой 60 000 Hz.

Прекращение колебаний генератора вследствие выбывания из строя ламп случается весьма редко и является аналогией остановки маятниковых часов. Такая остановка, однако, связана лишь с изменением стояния часов, которое по другим кварцевым часам может быть определено с величайшей точностью, и совершенно не влияет на ход часов.

Переменный ток от последнего трансформатора частоты приводит в движение синхронный мотор, простейшая конструкция которого показана на рис. 20. Контактный штифт этого мотора через

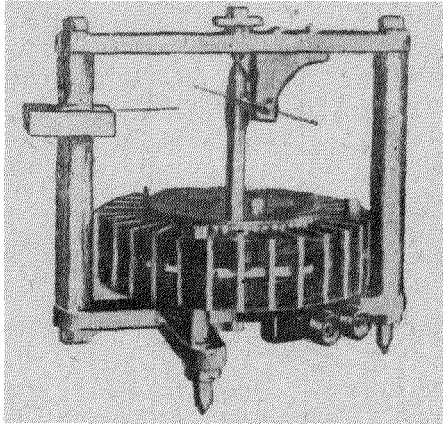


Рис. 20. Синхронный мотор

постоянные промежутки времени закорачивает сеточный контур изображенного на рис. 2 реле, так что конденсатор 2 анодной цепи разряжается через катушку регистрирующего прибора, который делает соответствующую отметку на ленте.

46. Измерения частоты часов, необходимые для определения мгновенных значений изменений хода, осуществляются при помощи катушек связи L_4 или L_6 рис. 19. Колебания исследуемой ча-

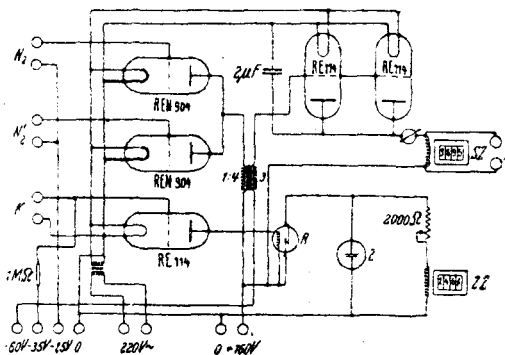


Рис. 21. Схема для получения биений

сты вместе с частотой других кварцевых часов подаются на клеммы N_2 и N_2' устройства, схема которого показана на рис. 21. Обе частоты усиливаются тремя лампами REN 904 и выпрямляются двумя лампами RE 114. Снятие частоты получающихся биений

происходит с клемм *A*, откуда она подается на клеммы *A* специального усилителя низкой частоты, изображенного на рис. 22. В этом последнем приборе происходит преобразование синусоидальных колебаний биений в резкие толчки тока, которые подаются с клемм *R* на катушку регистрирующего устройства. Измерение частоты биений, необходимое для определения мгновенных значений суточных изменений хода, производится при помощи стеклянного масштаба.

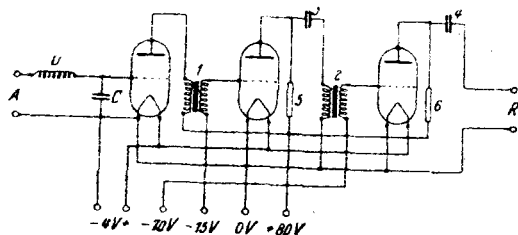


Рис. 22. Специальный усилитель низкой частоты

При не особенно высоких требованиях к точности промер хронограммы биений можно и не производить, так как синусоидальные биения, получаемые в схеме рис. 21, воздействуют на счетчик *SZ*, который регистрирует их число. По этому числу биений и соответствующему им промежутку времени, который регистри-

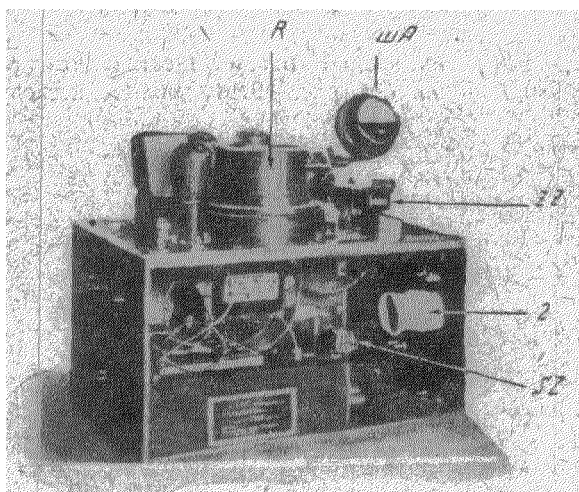


Рис. 23. Общий вид устройства для получения биений

руется счетчиком *ZZ* под действием сигналов от кварцевых часов, подаваемых на клеммы *K* (рис. 21), путем простого деления можно вычислить мгновенное значение разности хода обоих сравниваемых кварцевых часов.

На рис. 23 показан общий вид прибора, стена которого дана на рис. 21. Автоматический контроль часов, осуществляемый этим приспособлением, позволяет оставаться часы без наблюдения по целым дням, так как при этой системе контроля автоматически получают данные, необходимые для нахождения спящих элементов хода.

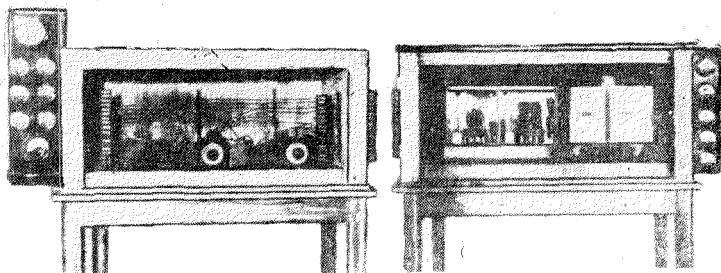


Рис. 24. Вид открытых кварцевых часов спереди

47. На рис. 24 показан вид спереди открытых кварцевых часов. Справа стоит внешний термостат с помещенным внутри внутренним термостатом, задающим генератором и усилителем, слева же — трансформаторы частоты. Контрольные измерительные приборы позволяют наблюдать за всеми колебательными контурами устрой-

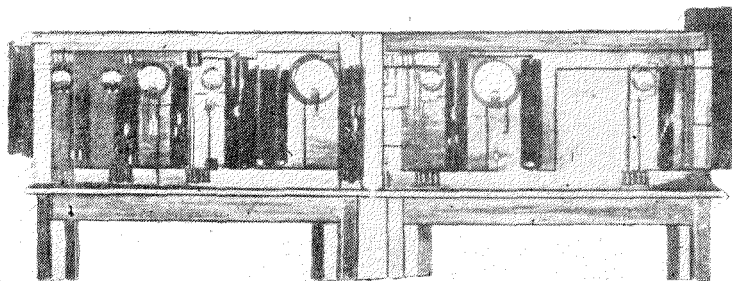


Рис. 25. Вид кварцевых часов с задней стороны

ства. Рис. 25 показывает вид кварцевых часов с задней стороны, где смонтированы необходимые для поддержания постоянства питания реостаты, амперметры и вольтметры.

Кристалльные часы Мэррисона ³⁷

48. На рис. 26 изображен общий вид кварцевого кольца, примененного в часах Мэррисона, а на рис. 27 — поперечный разрез смонтированного кольца. Монтаж такого кольца между соответствующим электродом является делом довольно сложным. Оно рас-

подвешен между двумя электродами, удерживаемыми на заданном расстоянии друг от друга кольцом из стекла пайрекс, и опирается на металлический шип.

С целью уменьшения трения внутренняя поверхность кварцевого кольца вышлифована так, что сечение его имеет V-образную

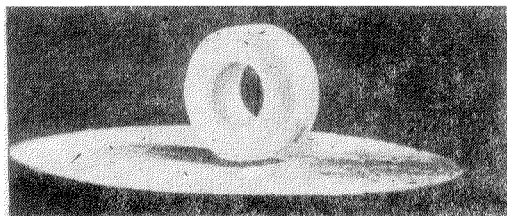


Рис. 26. Кварцевое кольцо „кристалльных часов“

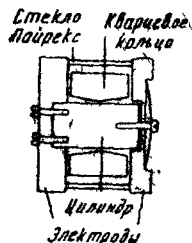


Рис. 27. Способ крепления кварцевого кольца

форму (рис 27). Кварцевое кольцо лежит совершенно свободно, вследствие чего при сотрясениях может менять свое расположение относительно электродов, что приводит к изменениям суточного

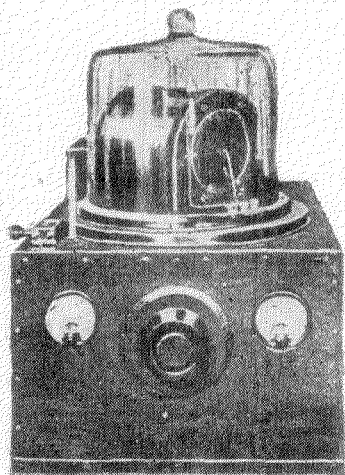


Рис. 28. Общий вид „кристалльных часов“

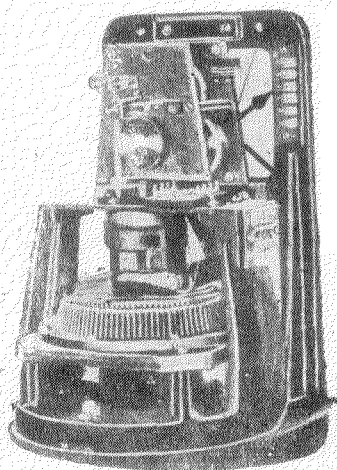


Рис. 29. Синхронный мотор „кристалльных часов“

хода. Мак Илрэйт ⁴⁰ особенно подчеркивает этот недостаток установки кварцевого кольца. Он пытался устранить этот дефект путем улучшения амортизации блока, заключающего управляющий кварц.

В часах Мэррисона управляющий кварц помещается в небольшой металлический термостат, постоянство температуры в котором поддерживается с помощью контактного термометра. Так как кварцевое

кольцо не находится в вакууме, для защиты от колебаний давления и влажности оно вместе с термостатом устанавливается под стеклянный колпак, в котором создается пониженное давление. Рис. 28 показывает внешний вид термостата под стеклянным колпаком. Подставкой для колпака является металлический ящик, в котором расположен генератор, между сеткой и катодом лампы которого согласно схеме Пирса³⁶ включается пьезокварц.

Собственная частота управляющего кварца в этих часах равна 100 000 Hz. После предварительного усиления частота генератора понижается в два приема — до 10 000 Hz и затем до 1000 Hz. 1000-периодный ток приводит в движение синхронный мотор, который для указания времени соединен с часовым механизмом и стрелками. Эти части кристалльных часов изображены на рис. 29. При посредстве часового механизма происходит приведение часов в соответствие с астрономическим временем. Мгновенные значения колебаний суточного хода измеряются автоматически по методу биений в контуре с частотой в 10 000 Hz.

49. Мэррисон указывает на основании 10-часового ряда измерений с двумя часами своей конструкции, что средние колебания разности хода между ними соответствуют от 0,001 до 0,002 сек. Для кратковременных измерений это хороший результат. Однако для длительных периодов этот тип кварцевых часов, повидимому, не столь пригоден. Лумис, Броун и Броуэр^{29,30} исследовали при помощи часов Мэррисона в лаборатории компании Бэлла (для которой Мэррисоном и были построены часы) ход трех часов Шортта. Они пришли к выводу, что часы Мэррисона дают большую точность при малых интервалах. При больших же преимуществе оказывается на стороне часов Шортта.

Мак Илрэйт⁴⁰ пытался улучшить кристалльные часы путем помещения их во второй термостат, а также регулировкой температуры помещения. В результате этих мероприятий не удалось получить существенных улучшений. В настоящее время постоянство хода кристалльных часов, как это было показано Адельсбергером⁴¹ посредством сравнения образцов обоих часов, оказывается по порядку величины ниже постоянства кварцевых часов PTR.

Ввиду этого в последующих разделах при обсуждении хода кварцевых часов, а также при сравнении с результатами, полученными с помощью маятниковых часов, мы не будем пользоваться данными, полученными с кристалльными часами. Сравнение с ними было бы легко осуществимо лишь в том случае, если бы об их ходе имелся столь же обширный материал, какой существует для кварцевых часов PTR.

d. Факторы, влияющие на ход кварцевых часов

50. Ход кварцевых часов g находится в следующем соотношении с частотой управляющего кварца:

$$g = \frac{N}{f} - 86\,400.$$

где N — полное число колебаний управляющего кварца. Зависимость хода g от частоты f из этой формулы получается в таком виде:

$$\frac{\delta g}{86400} = - \frac{\delta f}{f}.$$

Таким образом для того, чтобы найти изменение хода δg , нужно лишь исследовать факторы, определяющие собственную частоту f управляющего кварца.

Частота ненагруженного кварцевого стержня, совершающего продольные колебания, выражается как

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{s}},$$

где l — длина стержня, E — модуль упругости и s — плотность.

51. Поскольку l , E и s изменяются с изменением температуры, несомненно должна существовать зависимость хода g кварцевых часов от температуры.

В разделе 44 мы уже указывали, что, вырезая кварцевый стержень определенным образом, можно добиться того, что влияние колебаний температуры при средней температуре в 36°C будет устранено. Таким образом изменить ход часов могут лишь другие факторы, помимо температуры, влияющие на длину стержня l , модуль упругости E и плотность s . Механические изменения длины вследствие откалывания кусочков кварца, наблюдающиеся при сильной перегрузке пьезокварцевых приспособлений, в условиях работы кварцевых часов, где амплитуда колебаний стержня ничтожна, можно во внимание не принимать. Менее ясным является вопрос о том, могут ли при длительной работе E и s испытывать постепенные или мгновенные изменения.

И кристалльные часы Мэррисона и кварцевые часы Шейбе и Адельсбергера обнаруживают быстрое вначале и с течением времени уменьшающееся — постепенно или внезапно — уменьшение суточного хода. Кривая рис. 30 показывает изменение суточного хода кварцевых часов II относительно часов I после их пуска в ход. Вследствие уменьшения суточного хода часов II разность I—II становится больше; это изменение разностей хода уже давно кончилось. В то время, когда это явление было обнаружено, вследствие недостаточности данных предполагалось, что оно вызывается старением контактного термометра. Но так как в дальнейшем нечувствительные к колебаниям температуры кварцевые часы III и IV показали то же самое, следует считать, что это объяснение было неверным.

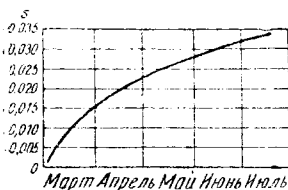


Рис. 30. Изменение разностей хода кварцевых часов I и II

Шейбе и Адельсбергер ⁷ в настоящее время, основываясь на своих опытах, не могут присоединиться к мнению, что это явление должно быть приписано старению кварцевого стержня, т. е. изменению его модуля упругости или плотности со временем. Эти авторы склоняются к мнению, что это уменьшение суточного хода является следствием постепенного изменения электрических данных кварцевых часов.

52. Следует помнить, что кварцевый стержень вследствие своей связи с генератором совершает колебания, частота которых хоть и мало, но все же измеримо зависит от частоты генератора. К счастью оказывается, что те данные схемы, которые в процессе длительной работы часов легче всего подвержены изменениям, а именно: анодное напряжение и напряжение накала, оказывают исключительно малое влияние на ход часов. Изменение анодного напряжения на 1 V (при 50 V на аноде) вызывает изменение хода всего лишь на 0,001—0,002 сек. Поддержание же постоянства анодного напряжения без всяких трудностей и без постоянного наблюдения осуществимо с точностью до 0,01 V. Влияние изменений напряжения накала оказывается еще значительно меньшим.

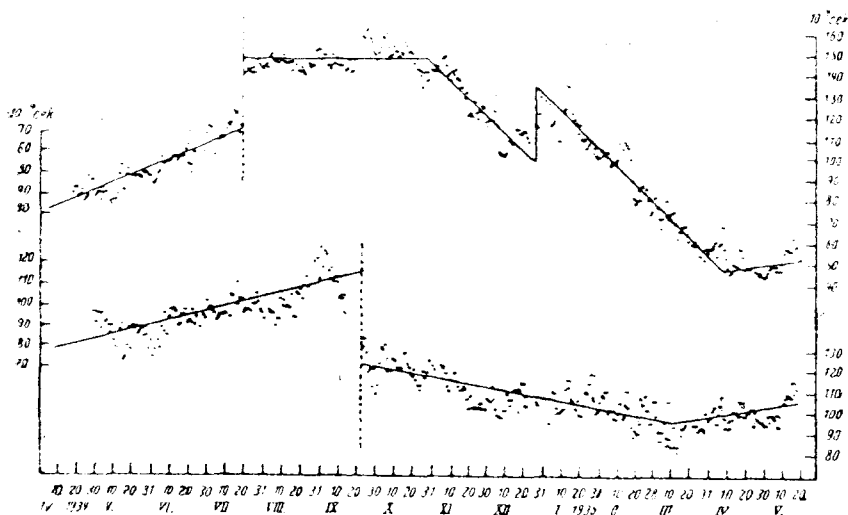


Рис. 31. Изменение разностей хода кварцевых часов II и III (вверху) и I и III (внизу)

Иначе обстоит дело с изменениями свойств ламп, а также с изменениями емкостей, включенных между анодом и сеткой и анодом и катодом. Эти величины сказываются на ходе часов. При их увеличении, так например, при параллельном включении добавочных емкостей ход замедляется. С полной достоверностью установлено, что описанные выше явления, т. е. постепенное изменение суточ-

ного хода часов, обусловлены влиянием емкостей, включенных между электродами лампы. В результате изучения этих явлений оказалось возможным изменить величину изменений суточного хода вновь включенных кварцевых часов таким образом, что изменения суточного хода двух часов друг относительно друга с самого начала оказываются малыми. Эти мероприятия ведут, следовательно, к уменьшению времени стабилизации хода кварцевых часов.

53. При несении практической службы времени такие равномерные изменения хода, которые к тому же весьма малы (у кварцевых часов III, например, они составляют 0,00002 сек. в сутки), не являются ни в какой мере препятствием к использованию кварцевых часов, так как они учитываются формулой хода. Кроме того, путем быстрого определения мгновенных значений изменения хода с легкостью устанавливается, в какой момент наступают и какую величину имеют эти постепенные изменения хода. На рис. 31 показан контрольный лист для чувствительных к температурным влияниям кварцевых часов I и II, для которых ежедневно измерялись мгновенные значения изменений хода относительно не подверженных температурным влияниям кварцевых часов III. У обоих часов

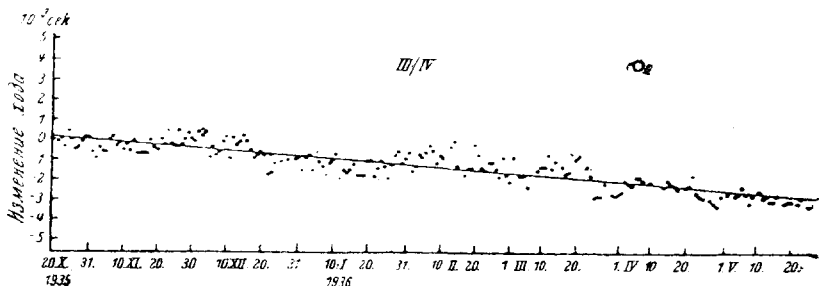


Рис. 32. Изменение разностей хода кварцевых часов III и IV

наблюдаются скачки в суточном изменении хода, которые вызваны изменением температуры помещения¹⁾. Скачкообразные изменения хода соответствуют вертикальным линиям, тогда как суточные изменения хода изображаются на рисунке наклонно прямыми, проведенными через точки, соответствующие отдельным измерениям. Так как абсолютная величина суточного хода кварцевых часов III, равная 0,00002 сек./сутки, известна с большой точностью, то при посредстве этого контрольного листа оказывается возможным дать для любого момента абсолютные величины хода часов I и II.

На рис. 32 изображены результаты контроля разности хода обоих не подверженных температурным влияниям кварцевых часов (часы III и IV) с момента включения часов IV для несения службы времени. Как видно, непрерывно происходит медленное уменьшение

¹⁾ Эти часы находятся в комнате, температура которой в соответствии с временами года колеблется от 12 до 28° С.

разности хода, составившее за 200 дней 0,003 сек., т. е. 0,000015 сек. в сутки. Разброс точек вокруг средней прямой не изображает действительных колебаний хода, но отражает среднюю ошибку измерений, которая в конце марта составляла 0,0006 сек. и с того времени уменьшилась на 0,0003 сек. На рисунке ясно видно происшедшее уменьшение разброса точек.

Рассмотренные в этом разделе факты показывают, что у кварцевых часов происходят изменения хода, обусловленные происходящими в них явлениями. С другой стороны, мы видим, что путем измерения мгновенных значений изменения хода легко определить величины этих измерений. Так как PTR имеет в своем распоряжении четверо кварцевых часов двух различных типов, то этим обеспечивается уверенность в том, что (быть может существующие) факторы, влияющие на ход всех часов одновременно, могут быть обнаружены. Эта уверенность основана на том, что, как было установлено, различные типы часов реагируют на воздействия неодинаково сильно.

54. Кварцевые часы имеют перед маятниковыми еще одно значительно большее преимущество. Частота колебаний управляющего кварца, а вместе с тем и ход кварцевых часов совершенно не зависят от ускорения силы тяжести. Изменения силы тяжести не оказывают на их ход никакого влияния, и потому только с помощью таких часов можно в любой момент определить с большой точностью (до нескольких тысячных или десятитысячных долей секунды) суточный ход. Вследствие этого для точных измерений частот при условии малых длительностей измерения применимы лишь кварцевые часы.

Влияние сотрясений на ход кварцевых часов также отсутствует, так как кварцевые стержни обладают малой массой, а крепление электродов, определяющих положение стержня между возбуждающими электродами, достаточно жестко. Из этого, конечно, не следует, что кварцевые часы не нужно устанавливать на амортизированные постаменты, устраняющие всякие сотрясения и колебания.

е. Ход кварцевых часов

55. Определение абсолютного суточного хода кварцевых часов происходит путем присоединения к науэнскому сигналу времени в 13^h01^m. Найденный таким путем абсолютный суточный ход g_v содержит в себе ошибку, свойственную сигналу времени. Эта ошибка устраняется посредством введения поправок S_z , публикуемых институтами службы времени. В результате получается исправленный суточный ход G_v , вычисляемый по g_v по следующей формуле:

$$G_v = g_v + (S_{z,v} - S_{z,v-1}),$$

где v обозначает номер суток.

В разделе 18 мы указывали, что поправка S_z сама заключает в себе значительные ошибки, так что определение суточного хода

кварцевых часов по сигналам времени приводит к неверным значениям хода. Для уменьшения влияния ошибки, связанной с S_z , целесообразно продлить измерения на значительное число n суток, причем n не должно быть меньше 30. Тогда получается средний суточный ход.

$$\bar{G} = g_0 + \frac{1}{30} (S_{z, 30} - S_{z, 0})$$

для 30-дневного интервала, верный до $1 - 2^0/0$, если в качестве S_z берется среднее из данных нескольких институтов.

56. Кварцевые часы I и II были пущены в эксплуатацию весной 1932 г., а часы III и IV — в 1933 г. С тех пор для всех этих часов производились непрерывные измерения среднего суточного хода G . Основным результатом этих измерений является, как уже указывалось в разделе 22, установление линейной формулы хода g :

$$g_t = g_0 + \Delta g t.$$

Для определения начального хода g_0 и суточных изменений хода согласно изложенному выше целесообразно пользоваться не величинами суточного хода, но средним значением его, определяемым из 30-дневных измерений. При этом формула хода принимает вид

$$G = G_0 + \Delta g n,$$

где G_0 обозначает средний суточный ход, соответствующий началу измерений, а n — число рядов измерений; Δg представляет собой изменение хода от одной последовательности к другой. Высокое постоянство хода кварцевых часов, контролируемое измерением мгновенных значений изменений хода, позволяет при этом, путем деления на число суток, принадлежащих одной серии измерений, находить ежесуточные изменения хода Δg для каждого суток.

57. На рис. 33 приведены кривые, изображающие суточный ход кварцевых часов I, II и III, начиная с 1933 г. Для часов I и II с октября 1933 г. по май 1934 г. данные отсутствуют, так как в этот промежуток времени происходила переделка часов. Этот пропуск перекрывается часами III, так что для определения времени имеются данные за весь период. Тем не менее мы ограничимся рассмотрением хода часов не за весь период, а именно: для часов III, начиная с момента их пуска, а для часов I и II — с мая 1934 г. Для суточных изменений хода Δg получаются следующие величины:

Кварцевые часы I — 0,00002 сек/сутки с 1/V 1934 по 2/IX 1934.
 + 0,00002 сек/сутки с 20/IX 1934 по 10/III 1935.
 — 0,00001 сек/сутки с 10/III 1935.

Кварцевые часы II — 0,00004 сек/сутки с 1/V 1934 по 20/VII 1934.
 0,0000 сек/сутки с 20/VII 1934 по 1/XI 1934.
 + 0,00008 сек/сутки с 1/XI 1934 по 8/IV 1935.
 — 0,00001 сек/сутки с 8/IV 1935.

Кварцевые часы III — 0,00009 сек/сутки с 1/VI 1933 по 31/XII 1933.
 — 0,00002 сек/сутки с 31/XII 1933.

Согласно этой таблице кварцевые часы I и II чаще обнаруживают изменения величины суточного изменения хода, чем часы III. Это является следствием их большей подверженности температурным влияниям, так что в этом отношении кварцевые часы III превосходят и часы II и часы I. Если, однако, путем определения мгновенных значений хода учесть изменения хода двух последних, то они оказываются вполне применимыми для определения времени.

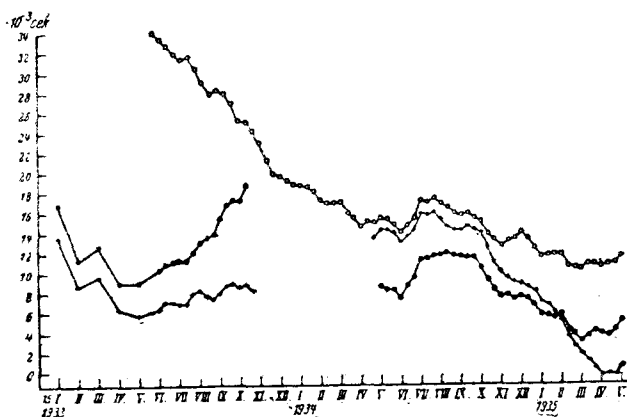


Рис. 33. Измеренные значения среднего хода \bar{G} кварцевых часов I (..), II (+ + +) и III (o o o)

Уменьшение величины изменения суточного хода часов II с $9 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-5}$ сек. должно рассматриваться как явление, обусловленное изменением свойств часов. Это явление неизменно наблюдается в первый период после пуска новых часов в ход. Ставшее постоянным изменение хода кварцевых часов III, равное $2 \cdot 10^{-5}$, весьма мало. Оно дает годовое изменение хода всего лишь в 0,0073 сек. Если бы это уменьшение не было принято во внимание при предвычислении стояния кварцевых часов, то при годовом сроке оно оказалось бы отличающимся от астрономического времени на 1,3 сек. Имеющийся экспериментальный материал с несомненностью указывает, что причину этих отклонений следует искать в самих кварцевых часах. Лишь в том случае, если бы все кварцевые часы, спустя достаточно долгое время после пуска, обнаружили одинаковые величины изменения хода, можно было бы считать, что причиной расхождения не являются сами часы.

В отношении кварцевых часов IV, которые в течение почти двух лет служили в PTR для исследования некоторых вопросов, связанных с изменением хода в первое время после включения, а с октября 1935 г. также используемых для несения службы времени, еще нет достаточных данных об изменениях абсолютного хода. Все, что о них можно сейчас сказать, это то, что они по меньшей мере не хуже часов III.

58. Знание величины Δg позволяет при посредстве формулы хода вычислить для каждых кварцевых часов суточные изменения хода или же средние изменения хода за 30 суток. Согласно разделу 22 разности между этими вычислительными значениями и наблюдаемыми изменениями хода представляют собой случайные колебания хода. Такого рода вычисления были проделаны Шейбе и Адельсбергером для кварцевых часов I, II и III. Ход найденных этим путем колебаний хода в зависимости от времени представлен на рис. 34. Колебания хода для всех трех часов имеют порядок нескольких тысячных секунды. Из этих величин определяется среднее случайное колебание, которое для кварцевых часов III (для периода в 30 суток) составляет $\pm 0,0013$ сек. Для часов I и II эта величина оказывается на несколько десятитысячных секунды больше.

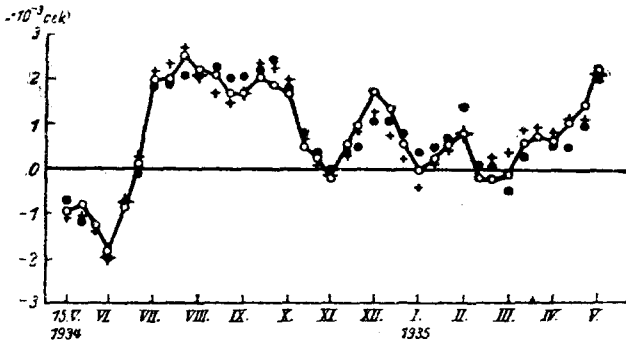


Рис. 34. Изменение разности между измеренными и вычисленными значениями \bar{G} согласно кварцевым часам I (...), II (+ + +) и III (ooo)

При этом вычислении ошибок предполагается, что имеющие место колебания хода вызываются лишь самыми кварцевыми часами. Это допущение, однако, не находит себе подтверждения в рис. 34, из которого ясно видно, что колебания хода всех часов в некоторые промежутки времени оказываются одинаковыми с точностью до нескольких десятитысячных секунды. Если считать, что колебания хода представляют собой явление случайное, то точки, относящиеся к отдельным часам в одинаковые моменты времени, должны были бы быть разбросаны в пределах $0,0013$ сек., что, как мы видим, не имеет места.

Ввиду этого с уверенностью можно высказать предположение, что пилообразный ход кривой рис. 34 связан с тем, что показания кварцевых часов сравниваются с астрономическими сутками. Этот взгляд становится еще более убедительным при рассмотрении рис. 35, где дана кривая снижения изменения между вычисленными и измеренными значениями хода за более ранний период, начиная с января 1933 г.

Эта кривая также обнаруживает пилообразный ход со столь же малым разбросом точек, относящихся к отдельным часам. Вместе

с тем указанное выше значение случайного колебания хода, равное 0,0013 сек., теряет свою реальность. Среднее случайное колебание должно быть меньше. Шейбе и Адельсбергер в соответствии с этим принимают среднюю величину случайного колебания хода кварцевых часов при интервале измерений в 30 суток, равной $\pm 0,00020$ сек.

Эта величина оказывается в 4,5 раза меньше, чем значение среднего случайного колебания хода средних астрономических часов,

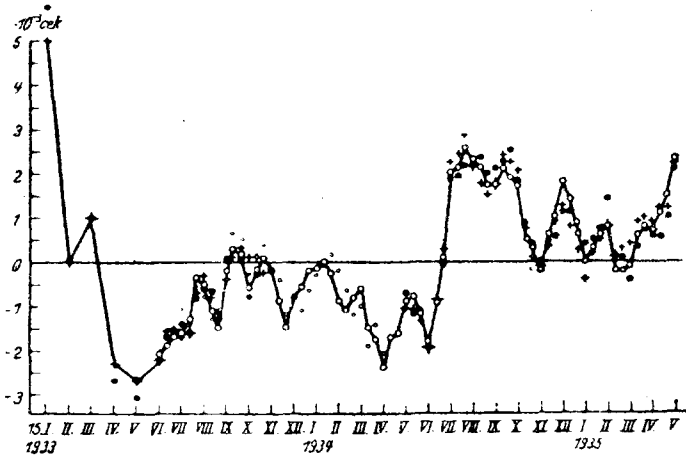


Рис. 35. Изменение разности между измеренными и вычисленными значениями \bar{G} согласно кварцевым часам I (...). II (+ + +), III (ooo) и IV (...).

составленных по данным трех институтов времени и равного 0,00090 сек. Из этого с несомненностью следует, что кварцевые часы в отношении постоянства хода превосходят средние астрономические часы. А так как средние астрономические часы институтов службы времени имеют своим первоисточником большое количество маятниковых часов, то ясно, что сравнение кварцевых часов с одними единственными маятниковыми должно быть еще более благоприятно для первых.

Правильность этих рассуждений оспаривается Стойко в его работе³². Возражения по этому вопросу были бы здесь, однако, неуместны.

59. Менее простым, чем нахождение случайных колебаний хода за период в 30 суток, является нахождение случайных суточных колебаний хода кварцевых часов. Если производить эту операцию, пользуясь сигналами времени, то вследствие больших колебаний в поправках колебания хода кварцевых часов оказываются чрезмерно большими. Допустимые величины получаются при использовании измерений мгновенных значений изменений хода. Из этих данных и из рассмотрения возможностей воздействия посторонних факторов на кварцевые часы однозначно следует, что верхняя гра-

ница суточных отклонений хода лежит у $\pm 0,001$ сек. Таким образом среднее суточное колебание хода оказывается ниже $0,001$ сек.

Эта верхняя граница случайных суточных колебаний хода определяет собой не только внутреннюю точность хода кварцевых часов, но характеризует и истинные колебания хода их относительно абсолютно постоянно идущих часов. Могущие быть найденными по измерениям мгновенных значений разностей хода внутренние случайные колебания хода оказываются согласно измерениям, проведенным в PTR, равными $0,0003$ сек.; в этом значении включена ошибка измерений, имеющая тот же порядок величины.

Павел и Уинк⁴³ путем проверки по сигналам времени нашли для двух кварцевых часов Геодезического института в Потсдаме (принадлежащих к типу III) внутреннее суточное случайное колебание хода равным от $0,00076$ до $0,00085$ сек., причем они указывают, что эта величина является максимальным значением. Поэтому указанные данные могут рассматриваться как свидетельство об исключительно низкой величине внутренних колебаний хода кварцевых часов.

IV. Постоянство хода кварцевых часов и постоянство длительности астрономических суток

60. Согласно Шейбе и Адельсбергеру⁷ отклонение вычисленного хода кварцевых часов от наблюдаемого, изображаемое пилообразными кривыми разностей хода на рис. 34 и 35, имеет своим происхождением не свойства самих кварцевых часов, но определение времени, произведенное институтами службы времени. Еще не вы-

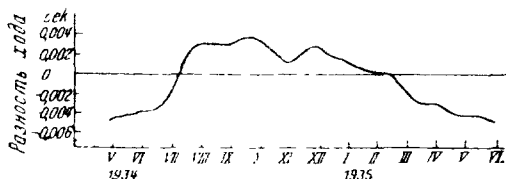


Рис. 36. Изменение разности между вычисленными и измеренными значениями хода кварцевых часов Геодезического института в Потсдаме

яснено, чему должны быть приписаны эти колебания — систематическим ли ошибкам, допускаемым при определении времени, или же изменениям длительности астрономических суток. Обращает на себя внимание увеличение хода, имевшее место в июне 1934 г. (рис. 35), равное $0,004$ сек. и с точностью до нескольких десятитысячных секунды одинаковое для всех часов (I, II и III). Критическое рассмотрение этого факта приводит к заключению, что с большой степенью вероятности это изменение хода должно быть

отнесено не на счет кварцевых часов, но на счет астрономического масштаба времени, т. е. длительности астрономических суток.

О правильности этого взгляда говорит не только тот факт, что все кварцевые часы PTR показывают одно и то же. Правильность его подтверждается также результатами Павла и Уинка⁴³, полученными с обоими кварцевыми часами Потсдамского геодезического института, построенными по типу и при содействии PTR. Ход этой пары часов определялся путем нахождения звездного времени самим Геодезическим институтом. Если по показаниям этой пары часов составить средние кварцевые часы и способом, указанным выше, вычислить разности между наблюдаемыми и вычисленными ходами, то кривая разности ходов оказывается имеющей вид, показанный на рис. 36. При сравнении рис. 36 с рис. 34 обнаруживается большое сходство в ходе обеих кривых. В частности, на кривой для потсдамских часов также ясно обнаруживаются резкое возрастание в июне 1934 г. и впадина в октябре — ноябре — декабре. Начиная с марта 1935 г., между обеими кривыми незаметно более никакого сходства. Причину этого следует искать в трудностях нахождения величины ускорения хода, фигурирующей в формуле хода, которая годилась бы для длительных промежутков времени. Вследствие небольших изменений этой величины вычисленные разности хода кварцевых часов PTR при полном сохранении общего вида кривой смогли бы, например, оказаться по истечении достаточно длительного времени отрицательными. При этом оказалось бы, что конечные части кривых рис. 34 и 35 имеют большее сходство.

Таким образом в реальности существования обнаруженного явления не может быть никаких сомнений. Новейшие измерения Шейбе и Адельсбергера¹² показывают, кроме того, что изменения длительности астрономических суток происходят, повидимому, периодически. В июне 1935 г. было вновь обнаружено увеличение хода, составлявшее 0,004 сек. Кривая разностей хода обнаружила такой же пилообразный ход, который наблюдался в 1934 г. На рис. 37 приведена кривая, изображающая разности хода кварцевых часов III за 1934 и 1935 гг. Кварцевые часы I и II обнаруживают то же изменение разностей, которое наблюдается, насколько можно судить, и для недавно включенных кварцевых часов IV. (При вычислении ускорения Δg по данным обоих лет величина его оказывается несколько иной, чем при вычислении только по данным 1934 г. Вследствие этого,

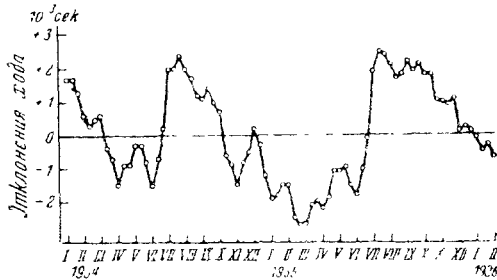


Рис. 37. Ход изменений между измеренными и вычисленными значениями \bar{G} для кварцевых часов III

как указывалось выше, разности хода для конца 1934 г. оказываются отрицательными.) Таким образом результаты измерений за 1935 г. подтверждают результаты 1934 г.

61. Данные измерений, которыми мы располагаем относительно хода различных кварцевых часов, с несомненностью указывают на то, что одинаковость продолжительности суток, определяемых по ним, превосходит таковую для определяемых институтами службы времени суток астрономических. Можно думать, что небольшие колебания, которые мы видим на рис. 34, 35 и 37, являются результатами систематических ошибок при определении времени по звездам или же других ошибок, вводимых институтами службы времени. Такое предположение, однако, нельзя высказать в отношении больших колебаний, наблюдающихся каждый июнь. Причину этих колебаний следует искать в самом астрономическом масштабе времени.

Если остановиться на последнем предположении, допустив существование ошибки в самом астрономическом масштабе времени (т. е. ошибок, связанных с системой Земля — временные звезды), то мы должны предположить или что существуют систематические ошибки в определении положений временных звезд, которые особенно сильно проявляются в июне, или же что происходят колебания скорости вращения Земли. В пользу первого предположения говорит то, что все институты службы времени, по данным которых производится определение хода кварцевых часов, совершенно одинаковым образом в апреле, мае и июне пользуются не теми временными звездами, которыми они пользуются в июле, августе и сентябре. Но, поскольку вплоть до самого написания настоящей статьи никаких указаний чисто астрономического характера на этот счет не появилось, правильность этого предположения не кажется особенно правдоподобной.

Иначе обстоит дело со вторым из приведенных выше предположением — с предположением о том, что имеют место колебания скорости обращения Земли вокруг ее оси, так как отклонения фактически наблюдаемой длительности лунного месяца от вычисленной на основании теории тяготения указывают на то, что существуют колебания скорости вращения Земли вокруг ее оси. Мейерман⁴⁴ подробно исследовал указанные данные в отношении Луны и планет и пришел к выводу, что „можно считать несомненным, что скорость вращения Земли вокруг ее оси подвержена неправильным колебаниям. При этом годовой ход Земли (термины „ход“ и „стояние“ имеют здесь тот же смысл, что и в применении к часам) может достигать ± 1 сек., а стояние Земли может иметь величину ± 30 сек. (а может быть, и много больше)“.

В настоящее время еще, конечно, невозможно пытаться делать на основании найденных с помощью кварцевых часов колебаний длительности астрономических суток какие-либо определенные выводы, за исключением того, что благодаря исключительно постоянству хода этих часов становится возможным наблюдение за постоянством скорости вращения Земли вокруг ее оси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

62. Точнейшее измерение времени является основой и необходимой предпосылкой для многих точных физических измерений, примером которых может служить измерение высоких частот, необходимое в радиотехнике. Поэтому целью настоящей статьи было дать обзор экспериментальных работ многих исследователей, посвященных перенесению времени от временных звезд, „сохранению“ времени при помощи земных хронометров, а также разработке новых и усовершенствованию старых приборов, измеряющих время — маятниковых часов и часов кварцевых.

Космической мерой времени являются астрономические сутки, представляющие собой отрезок времени, определяемый одним оборотом земного шара вокруг его оси. Установление момента времени посредством этого масштаба в настоящее время не является возможным с точностью более чем до $\pm 0,02$ сек. Эта точность оказывается ниже той, с которой возможно определение момента времени с помощью лучших астрономических часов, существующих в настоящее время. Поэтому увеличение точности перенесения времени, необходимое для уточнения измерений времени, является крайне желательным. Впредь до осуществления этого увеличения точности, уменьшение влияний точности измерений времени на суточный ход часов, а вместе с тем и на производимые с помощью этих часов физические измерения возможно лишь посредством увеличения продолжительности промежутков времени наблюдения за часами.

Исследования Рифлера, Шортта и Шулера имели, поэтому, целью создание таких маятниковых часов, которые благодаря высокому постоянству хода позволяли бы охватывать большие промежутки времени. Нами были рассмотрены различные факторы, влияющие на ход часов, и способы устранения их влияний, применимые в различных конструкциях. Лучшими маятниковыми часами являются в настоящее время часы Шортта.

Наряду с маятниковыми часами ввиду наличия потребности в еще более совершенном измерителе времени, особенно для коротких интервалов, были разработаны кварцевые часы. Подробное рассмотрение устройства и свойств кварцевых часов, построенных Шейбе и Адельсбергером, показывает, что в смысле однородности хода они превосходят как астрономические маятниковые часы, так и кристалльные часы Мэррисона (представляющие собой другой тип кварцевых часов) как для малых, так и для больших и очень больших промежутков времени. Наблюдающиеся колебания среднего хода этих часов, определенного по данным измерений за промежутки времени в 30 суток, которые оказываются почти совпадающими для четырех различных экземпляров, с большой вероятностью должны быть приписаны систематическим ошибкам, допускаемым при определении времени институтами службы времени, а также непостоянству скорости вращения Земли вокруг ее оси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Berliner Astronomisches Jahrbuch für 1936, herausgeg. vom Astronomischen Rechen-Institut Berlin.
2. Arch. dtsch. Seewarte **54**, H. 5, 1936.
3. A. Scheibe u. U. Adelsberger, Z. Hochfrequenztechn. u. El. Ak., **43**, 37, 1934.
4. K. Schütte, Astronom. Nachr., **254**, 251, 1934.
5. H. C. Freiesleben u. F. Lange, Ann. Hydrogr. Berl., **64**, 60, 1936.
6. N. Stoyko, Sur la mesure du temps et les problemes, qui s'y rattachent, p. 19, Paris 1931.
7. A. Scheibe u. U. Adelsberger, Physik. Z., **37**, 185, 1936.
8. A. Repsold, Astronom. Nachr., **246**, 231, 1932.
9. K. Schütte, Astronom. Nachr., **247**, 173, 1932.
10. Bull. Horaire, **5**, 268, 1935.
11. N. Stoyko, Ann. franç. Chronom., **4**, 221, 1934.
12. A. Scheibe u. U. Adelsberger, Physik., Z. **37**, 415, 1936.
13. A. Scheibe u. U. Adelsberger, Ann. Physik, **18**, 1, 1933.
14. F. Göpel u. W. Keil. ATM J., **151**, 1. 2, 1932.
15. M. Schuler, Physik. Z., **30**, 884, 1929; Z. techn. Physik, **10**, 392, 1929; **12**, 678, 1931.
16. J. Jackson a. W. Bowyer, Monthly not., **88**, 465, 1928.
17. J. Jackson a. W. Bowyer, Monthly not., **90**, 268, 1930.
18. M. Schuler, Schriftreihe Ges. Zeitmesskde u. Uhrentechn., **6**, 95, 1935.
19. G. Gengler, Astronom. Nachr., **247**, 185, 1932.
20. A. Repsold, Astronom. Nachr., **247**, 301, 1932.
21. G. Schmerwitz, Z. Instrumentenkde, **52**, 1, 1932.
22. H. Gebelein, Z. Geophysik, **8**, 272, 1932.
23. H. Gräff, Z. Geophysik, **11**, 144, 1935.
24. Ferrié et Jouaust, C R., **184**, 56, 1927.
25. A. L. Loomis a. W. A. Marrison, J. Am. Inst. electr. Eng., **51**, 542, 1932.
26. H. Gebelein, Astronom. Nachr., **248**, 33, 1933.
27. E. Rieckmann, Physik. Z., **34**, 831, 1933.
28. R. Tomaschek, Erg. exakt. Naturwiss., **12**, 36, 1933.
29. A. L. Loomis, Monthly not., **91**, 569, 1931.
30. E. W. Brown a. D. Brouwer, Monthly not., **91**, 575, 1931.
31. E. Troussein u. H. C. Freiesleben, Astronom. Nachr., **242**, 233, 1931.
32. Bull. Horaire, **6**, 25, 1936.
33. W. G. Cady, Proc. Inst. Radio Eng., **10**, 88, 1922.
34. J. Curie et P. Curie. C. R., **91**, 294, 1880.
35. E. Giebe u. A. Scheibe, Z. Physik, **46**, 607, 1928 Z. Hochfrequenztechn. u. El. Ak., **41**, 83, 1933.
36. G. W. Pierce, Proc. Am. Acad. Arts. a. Sci., **60**, 271, 1925.
37. W. A. Marrison, Proc. Inst. Radio Eng., **17**, 1103, 1929.
38. F. R. Lack, Proc. Inst. Radio Eng., **17**, 1123, 1929.
39. E. Giebe u. A. Scheibe, Elektr. Nachr.-Techn., **5**, 65, 1928.
40. McIlwraith, Nat. Res. Council., **29**, 1931.
41. U. Adelsberger, Elektr. Nachr.-Techn., **12**, 83, 1935.
42. A. Scheibe u. U. Adelsberger, Physik. Z., **33**, 835, 1932.
43. F. Pavel u. W. Uhlir, Astronom. Nachr., **257**, 365, 1935.
44. B. Meyermann, Erg. exakt. Naturwis., **7**, 92, 1928.
45. Г. Симон и Р. Зурман, „Фотоэлементы и их применение“, ОНТИ, 1936, стр. 246 и след.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Ю. Б. Румер, Москва

§ 1. ВВЕДЕНИЕ

Перед теорией сверхпроводимости стоят две задачи. Во-первых, дать феноменологическую картину явления, т. е. выяснить количественные законы, характеризующие сверхпроводимость, во-вторых, установить механизм, обуславливающий появление сверхпроводимости.

В то время как все попытки найти путь к решению второй задачи оказались до сих пор неудачными, на пути к решению первой задачи мы имеем за последнее время значительные успехи.

С тех пор как в 1911 г. Камерлинг-Оннес¹ впервые обнаружил, что при температуре в $4,22^{\circ}\text{K}$ ртуть становится сверхпроводящей, явление сверхпроводимости было обнаружено у следующих элементов (табл. 1).

Таблица 1

Nb	$9,20^{\circ}$	Hg	$4,22^{\circ}$	Ti	$1,75^{\circ}$	Zn	$0,78^{\circ}$
Pb	$7,20^{\circ}$	Sn (белое)	$3,71^{\circ}$	Th	$1,50^{\circ}$	Zr	$0,70^{\circ}$
Ta	$4,40^{\circ}$	In	$3,37^{\circ}$	Al	$1,14^{\circ}$	Cd	$0,60^{\circ}$
V	$4,30^{\circ}$	Tl	$2,37^{\circ}$	Ga	$1,05^{\circ}$	Hf	$0,35^{\circ}$

До сих пор неясно, является ли сверхпроводимость свойством лишь определенной группы металлов или появляется во всяком проводнике при достаточно сильном охлаждении. Кроме того, сверхпроводимость обнаружена в целом ряде сплавов; однако явления в них оказываются значительно более сложными, и мы их не будем касаться в нашем обзоре, ограничиваясь лишь чистыми сверхпроводниками.

В дальнейшем мы кратко остановимся лишь на тех опытных фактах, которые имеют значение для современной теории сверхпроводимости. Более подробное изложение читатель найдет в статьях В. Кеезома и В. Мейсснера².

§ 2. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Опыт показывает, что сверхпроводники обладают весьма своеобразными магнитными свойствами.

В 1933 г. Мейсснер и Оксенфельд³ и независимо от них Л. В. Шубников⁴ обнаружили, что магнитная индукция B внутри сверхпроводника изменяется при переходе в сверхпроводящее состояние. Они поместили цилиндр из олова в перпендикулярное магнитное поле и охладили его ниже температуры перехода в сверхпроводящее состояние. До тех пор, пока цилиндр находился в нормальном состоянии, магнитные линии имели форму, как на рис. 1а. Как только он переходил в сверхпроводящее состояние, происходило изменение в магнитных линиях и получалось распределение (рис. 1б), примерно совпадающее с тем, которое получается, если вычислить поле в предположении, что во всех точ-

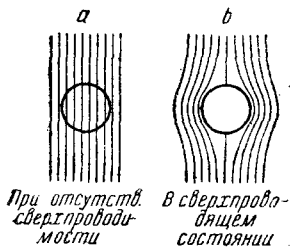
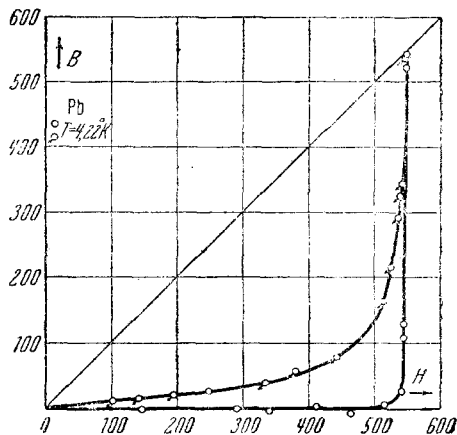


Рис. 1.



ках внутри сверхпроводника магнитная индукция B равна нулю.

Переход из нормального в сверхпроводящее состояние и обратно может быть осуществлен не только изменением температуры, но и при постоянной температуре изменением внешнего магнитного поля. Если данный стержень находится в сверхпроводящем состоянии, то его сопротивление восстанавливается при наложении достаточно сильного внешнего продольного поля $H_{кр}$. Чем ниже температура, тем большая напряженность требуется для восстановления нормального состояния. Кривая зависимости $H_{кр}$ от температуры для олова приведена на рис. 2.

Переход сверхпроводника в нормальное состояние происходит также и при пропускании достаточно сильного тока. Как впервые заметил Силсби⁵, переход совершается в тот момент, когда магнитное поле тока достигает на поверхности проводника своего критического значения. Обозначая через r радиус проводника и через $j_{кр}$ критическую силу тока, получаем соотношение $\frac{2j_{кр}}{r}$, хорошо подтвержденное опытом.

При обратном уменьшении внешнего магнитного поля ниже критического наблюдаются явления гистерезиса. На рис. 3 приведена диаграмма, полученная Л. В. Шубниковым для олова. Мы видим, что до достижения критического значения внешнего поля магнитная индукция равна нулю, принимая в точке перехода скачком свое нормальное значение $B = H$. При обратном переходе мы наблюдаем некоторую остаточную магнитную индукцию, лишь постепенно уменьшающуюся до нуля.

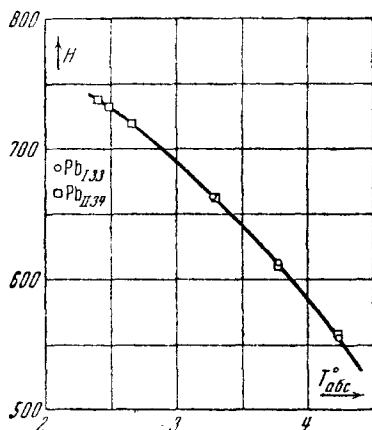


Рис. 3.

§ 3. ТЕРМОДИНАМИКА СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Еще в 1911 г. на Сольвейском конгрессе П. Ланжевэн высказал мысль, что переход из нормального состояния в сверхпроводящее является фазовым переходом. Эта мысль в настоящее время получила полное подтверждение.

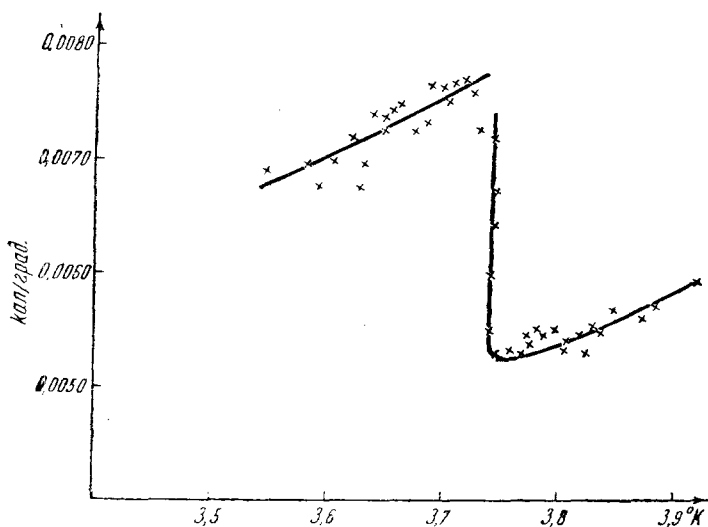


Рис. 4.

Опыты Кеезома и Энде⁶ и Кеезома и Кока⁷ обнаружили скачок теплоемкости при переходе из нормального состояния в сверхпроводящее (рис. 4). Рутгерс дал качественное и количественное

объяснение этому скачку, исходя из представления об обратимом переходе из одной фазы в другую.

Исходя из представления о двух фазах, сверхпроводящей и нормальной, обозначим термодинамические потенциалы обеих фаз через Φ_s и Φ_n . При температуре, ниже критической, T_0 устойчива первая фаза $\Phi_s < \Phi_n$ (рис. 5).

Рассмотрим длинный стержень во внешнем продольном магнитном поле H_a . Напряженность H внутри сверхпроводника будет $H = H_a$, так как тангенциальная слагающая вектора \mathbf{H} непрерывна. При включении магнитного поля H_a магнитный момент единицы объема сверхпроводника будет (так как $B = H + 4\pi M = 0$) $\mathbf{M} = -\frac{1}{4\pi} \mathbf{H}$. Следовательно, при включении магнитного поля энергия сверхпроводника возрастает. Дополнительная энергия единицы массы сверхпроводника

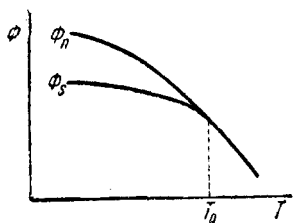


Рис. 5.

равна $-\frac{1}{\rho} \int_0^H M dH = \frac{H^2}{8\pi\rho}$, где ρ — плотность. Термодинамический потенциал единицы массы сверхпроводника, помещенного в магнитное поле, будет, следовательно, $\Phi_s + \frac{1}{8\pi\rho} H^2$. В точке перехода должно соблюдаться равенство

$$\Phi_s + \frac{1}{8\pi\rho} H_{\text{кр}}^2 = \Phi_n.$$

По известным формулам термодинамики получаем для разности теплоемкостей в сверхпроводящей и нормальной фазе

$$C_s - C_n = -T \frac{d^2}{dT^2} (\Phi_s - \Phi_n),$$

откуда, подставляя $\Phi_n - \Phi_s = \frac{1}{8\pi\rho} H_{\text{кр}}^2$, получаем формулу Рутгерса

$$C_s - C_n = T \frac{d^2}{dT^2} \left(\frac{H_{\text{кр}}^2}{8\pi\rho} \right) = \frac{T}{4\pi\rho} \left\{ \left(\frac{dH_{\text{кр}}}{dT} \right)^2 + H_{\text{кр}} \frac{d^2 H_{\text{кр}}}{dT^2} \right\}.$$

Поскольку в точке перехода $H_{\text{кр}} = 0$, мы получаем для формулы Рутгерса окончательно

$$C_s - C_n = \frac{T}{4\pi\rho} \left(\frac{dH_{\text{кр}}}{dT} \right)_{T=T_0}^2.$$

В табл. 2 сопоставлены результаты опытов и вычислений, прекрасно согласующиеся друг с другом. Таким образом представление о двух

Таблица 2

Элементы	T_0	$\frac{dH}{dT}$ гаусс/град.	$C_s - C_n \left(\frac{\text{кал.}}{\text{град} \cdot \text{моль}} \right)$	
			вычисл.	опыт
Sn	3,71	151,2	0,00229	0,00240
Te	2,36	137,4	0,00144	0,00148

фазах и обратимом переходе из одной фазы в другую получает полное подтверждение.

Теплота перехода сверхпроводящего состояния в нормальное в присутствии магнитного поля определяется формулой

$$Q = T(S_n - S_s),$$

где S_s и S_n обозначают энтропию сверхпроводящего и нормального состояний. По формулам термодинамики имеем

$$Q = T \frac{d}{dT} (\Phi_s - \Phi_n) = - \frac{T}{4\pi\sigma} H_{кр} \frac{dH_{кр}}{dT}$$

и получаем численную зависимость между теплотой перехода и ходом зависимости критического магнитного поля от температуры. Измерения Кеезома обнаружили и в этом случае согласие между теорией и экспериментом.

§ 4. Промежуточное состояние

Явление несколько осложняется, если мы перейдем от длинных стержней к телу произвольной формы. Как показывает опыт, мы в этом случае имеем уже не два, а три состояния:

1) сверхпроводящее, при котором $B = 0$, 2) промежуточное состояние, при котором B отлично от нуля, но не достигает еще своего нормального значения, и, наконец, 3) нормальное состояние, при котором $B = H^1$). Для того чтобы объяснить зависимость магнитных свойств сверхпроводника от его геометрической формы, следует учесть размагничивающий фактор.

Размагничивающий фактор. Если поместить тело, имеющее форму эллипсоида, во внешнее магнитное поле H_a , направленное вдоль одной из его осей, то внутри тела напряженность магнитного поля H и магнитная индукция B будут выражаться через

$$\left. \begin{aligned} H &= H_a - 4\pi nM, \\ B &= H_a - 4\pi nM + 4\pi M = H_a + 4\pi(1-n)M \end{aligned} \right\} (*)$$

1) В дальнейшем мы всегда полагаем, что в переменном состоянии магнитная проницаемость $\mu = 1$.

где M — намагничивание, а n — так называемый размагничивающий фактор¹⁾

$$n = \frac{abc}{2} \int_0^{\infty} \frac{d\tau}{(a^2 + \tau) \sqrt{(a^2 + \tau)(b^2 + \tau)(c^2 + \tau)}}$$

a, b, c — полуоси эллипсоида; магнитное поле направлено по оси a .

Нас интересуют специальные случаи:

1. Круглый длинный цилиндр в продольном поле

$$a \gg b; \quad b = c; \quad n = 0.$$

2. Круглый длинный цилиндр в поперечном поле

$$c \gg b; \quad b = a; \quad n = \frac{1}{2}.$$

3. Тонкая пластинка в поперечном поле

$$b \gg a; \quad b = c; \quad n = 1.$$

4. Шар

$$a = b = c; \quad n = \frac{1}{3}.$$

Исключив M из уравнений (*), мы получим условие, которому должны удовлетворять H и B внутри тела, если внешнее поле

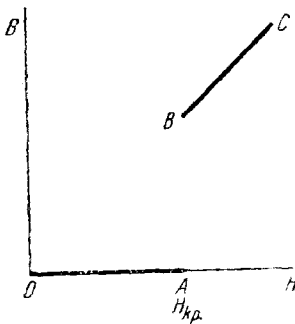


Рис. 6.

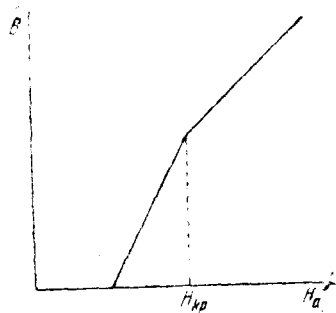


Рис. 7.

равно H_a

$$B_n + H(1 - n) = H_a.$$

Посмотрим теперь, как связаны между собой у сверхпроводника H и B . Из опытов с длинным стержнем в продольном поле мы выяснили, что поскольку для него

$$B = 0 \quad \text{при} \quad H < H_{кр},$$

$$B = H \quad \text{„} \quad H > H_{кр},$$

¹⁾ См., например, Я. И. Френкель, *Электродинамика*, т. II, стр. 488.

и, следовательно, зависимость H от B изобразится разрывной функцией $H = f(B)$, изображенной на рис. 6.

Для того чтобы выяснить ход кривой $H = f(B)$ в области $0 < B < H_{кр}$, рассмотрим тело с отличным от нуля размагничивающим фактором. Опыт показывает следующее (рис. 7). До некоторого значения внешнего поля H_a , меньшего критического, мы имеем $B = 0$, т. е. сверхпроводящее состояние. Затем, при увеличении внешнего поля до критического значения, индукция B отлична от нуля и растет линейно, достигая своего нормального значения при $H_a = H_{кр}$. Мы имеем перед собой так называемое промежуточное состояние. Наконец, при $H_a > H_{кр}$ образец переходит в нормальное состояние. Подставляя в уравнение

$$B_n + H(1 - n) = H_a$$

функцию $H = f(B)$, мы имеем:

$$B_n + f(B)(1 - n) = H_a$$

и из наблюдаемого на опыте линейного возрастания B в промежуточном состоянии заключаем, что и в нем $f(B)$ будет линейной функцией. Следовательно, ход зависимости $H = f(B)$ изобразится ломаной кривой $OABC$ (рис. 8). Пересекая ее прямой

$$B_n + H(1 - n) = H_a,$$

отсекаящей на осях H и B соответственно отрезки $\frac{H_a}{1-n}$ и $\frac{H_a}{n}$, мы получаем значения для H и B , соответствующие внешнему полю H_a . Например, в случае длинного стержня в поперечном поле $n = \frac{1}{2}$, и мы имеем

$$\frac{H_a}{\frac{1}{2}} < H_{кр} \text{ сверхпроводник}$$

$$\frac{1}{2} H_{кр} < H_a < H_{кр} \text{ промежуточное состояние}$$

$$H_a > H_{кр} \text{ нормальное состояние}$$

В случае шара $n = \frac{1}{3}$, и мы имеем

$$\frac{H_a}{\frac{2}{3}} < H_{кр} \text{ сверхпроводник}$$

$$\frac{2}{3} H_{кр} < H_a < H_{кр} \text{ промежуточное состояние}$$

$$H_a > H_{кр} \text{ нормальное состояние}$$

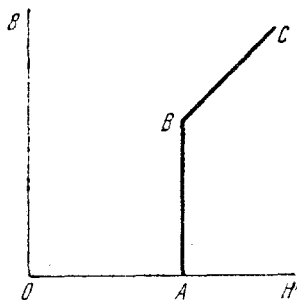


Рис. 8.

В случае пластинки $n = 1$ мы совершенно не имеем сверхпроводящего состояния. Уже ничтожное внешнее поле переводит сверхпроводящее состояние в промежуточное, переходящее при $H_a = H_{кр}$ в нормальное.

§ 5. Природа промежуточного состояния

Какова же природа промежуточного состояния? Не имеем ли мы дело с третьей фазой вещества, отличающегося от сверхпроводящей и нормальной? Ответ на этот вопрос дает одна из последних работ Л. Д. Ландау¹⁰.

Рассмотрим пластинку в поперечном магнитном поле. Ландау показывает, что если H_a лежит в интервале $0 < H_a < H_{кр}$, то термодинамически устойчивым будет состояние, когда образец разбивается на слои попеременно

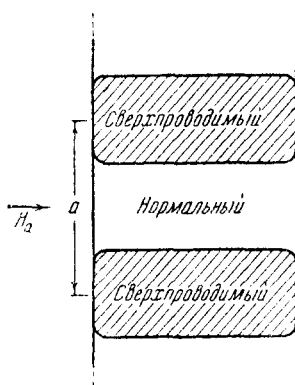


Рис. 9.

сверхпроводящие и нормальные, отстоящие друг от друга на некотором расстоянии a . Рассмотрим ближе эти слои. Линии магнитной индукции не проникают в сверх-

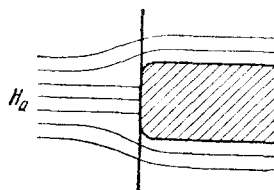


Рис. 10.

проводящие слои, а проходят лишь в нормальные слои. На границе двух слоев нормальная составляющая напряженности магнитного поля равна нулю (вследствие непрерывности нормальных составляющих вектора \mathbf{B}). Тангенциальная компонента вектора напряженности \mathbf{H} равна, очевидно, значению критического поля $H_{кр}$; иначе часть вещества перешла бы из одной фазы в другую. Эти условия позволяют полностью разрешить задачу о форме слоев при заданном расстоянии между ними.

Эта задача математически эквивалентна следующей задаче гидромеханики. Поток жидкости, имеющий на бесконечности скорость $H_{кр}$, обтекает быки моста, расположенные на расстоянии a друг от друга. Требуется определить форму быков так, чтобы жидкость обтекала быки с заданной тангенциальной скоростью $H_{кр}$. Задача решается, подобно другим плоским задачам гидромеханики, методом теории функции комплексной переменной.

Для того чтобы определить расстояние a между отдельными сверхпроводящими слоями, заметим, что два фактора влияют на эту величину:

1. Увеличение количества слоев (т. е. уменьшение расстояния) ведет к увеличению капиллярной энергии, что энергетически невыгодно.

2. Уменьшение количества слоев (т. е. увеличение расстояния между слоями) увеличивает искривление магнитных линий при переходе в проводник, что вызывает, как показывает расчет, увеличение энергии проводника.

Оба эти фактора действуют в противоположные стороны, и устойчивым будет то состояние, при котором расстояние между слоями будет соответствовать минимуму энергии.

Расчет показывает, что величина капиллярной энергии обратно пропорциональна расстоянию между слоями, в то время как дополнительная энергия, обусловленная искривлением магнитных линий, растет прямо пропорционально расстоянию. Следовательно, зависимость термодинамического потенциала от a будет иметь вид

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{A}{a} + B a.$$

Условие минимума для Φ дает

$$\Phi'(a) = 0; \quad -\frac{B}{a^2} + C = 0,$$

откуда получаем для a значение

$$a = \sqrt{\frac{B}{C}}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Camerling-Onnes, Proc. Amster. Acad., **27**, 75, 1911.
2. В. Кеезом, Успехи физич. наук, **15**, 181, 1935; В. Мейснер, Успехи физич. наук, **15**, 207, 1935.
3. Meissner u. Ochsenfeld, Naturwiss., **21**, 787, 1933.
4. Schubnikow, Nature, **134**, 286, 1934.
5. Silsbee, J. Wash. Acad. Sci., **6**, 597, 1916.
6. Keesom a. v. Ende, Proc. Amst. Acad. Sci., **35**, 143, 1932.
7. Keesom a. Kok, Physica, **1**, 175, 1934.
8. Rutgers, Proc. Amster. Acad., **36**, 153, 1933.
9. R. Peierls, Proc. Roy. Soc., London, **155**, 613, 1936.
10. Landau, Phys. Z. d. Sowjetun., **11**, 129, 1937.