

В.В. Брандт

Авиационные приборы

Часть 4. Гироскопические приборы

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 656
ББК 39.1
В11

В11 **В.В. Брандт**
Авиационные приборы: Часть 4. Гироскопические приборы / В.В. Брандт –
М.: Книга по Требованию, 2015. – 172 с.

ISBN 978-5-458-38429-2

ISBN 978-5-458-38429-2

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2015

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2015

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

В этом случае наблюдатель будет видеть лишь след плоскости горизонта в виде прямой. Рисунок наглядно показывает вращение плоскости горизонта относительно мирового пространства. Угловая скорость этого вращения совпадает с угловой скоростью вращения земли, т. е. равна 1 обороту за 24 часа, или 15° в час. Для наблюдателя, находящегося на плоскости горизонта, восточная сторона плоскости будет непрерывно опускаться, а западная подниматься.

Определим ось, относительно которой происходит вращение плоскости горизонта.

Если внимательно посмотреть на рис. 2 и 3, то можно заметить, что вращение плоскости горизонта происходит вокруг полуденной линии, которая никакого изменения своего положения в пространстве не имеет, а следовательно, не вращается. Здесь необходимо предостеречь читателя от обычной ошибки, допускаемой в данном вопросе. Не следует путать понятие „переместится в пространстве“ с понятием „вращается в пространстве“. Первое действительно имеет место по отношению к полуденной линии, однако, при этом „перемещении“ направление полуденной линии в пространстве не изменяется, а следовательно, вращения нет. Если же мы, помня, что размеры земли чрезвычайно ничтожны по сравнению с размерами мирового пространства, „превратим“ землю в точку, то очевидно, что полуденная линия сольется с осью земли, а эта последняя не изменяет своего положения в пространстве при суточном вращении земли.

Это следует иметь в виду и при дальнейших рассуждениях. Таким образом, на экваторе плоскость горизонта и полуденная линия ведут себя следующим образом:

- 1) плоскость горизонта вращается в пространстве относительно полуденной линии с угловой скоростью 15° в час;
- 2) полуденная линия на экваторе вращения в пространстве не имеет.

На Северном полюсе. На рис. 4 изображена плоскость горизонта для Северного полюса так, как она будет видна наблюдателю, находящемуся в мировом пространстве над земным экватором.

Нетрудно сообразить, что в этом случае суточное вращение земли не может вызвать никакого изменения в положении плоскости горизонта, т. е. последняя не будет иметь вращения в пространстве.

Это обстоятельство находит себе подтверждение в том, что в приполярной части земного шара с наступлением полярного дня солнце в течение суток не скрывается за горизонт, т. е. плоскость горизонта имеет такое малое вращение, что не в состоянии скрыть солнце от наблюдателя.

Теперь посмотрим, что происходит на Северном полюсе с полуденной линией. Прежде всего нужно сказать, что понятие „полуденная линия“ для полюса не имеет смысла, так как для этой точки невозможно представить направление север—юг,

ибо здесь пересекаются все меридианы. Если наблюдателя поставить точно на Северный полюс, то вокруг него будет одно и то же направление, а именно—юг. Однако, мы условно можем взять любую прямую, лежащую в плоскости горизонта, и принять ее за полуденную линию. На рис. 5 изображена земля при наблюдении ее из мирового пространства со стороны Северного полюса. Малым кругом показана плоскость горизонта для точки полюса.

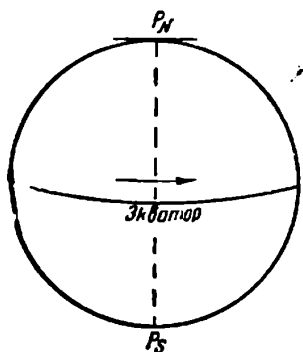


Рис. 4. Плоскость горизонта на полюсе

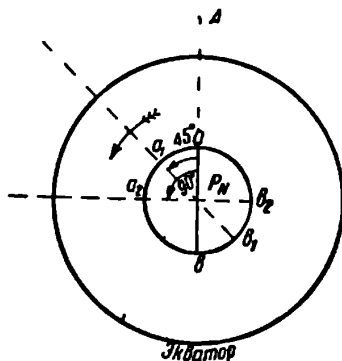


Рис. 5. Вращение полуденной линии на полюсе

Линия av условно принята за полуденную линию. Предположим, что в начальный момент (0 часов) линия av была направлена на какую-либо звезду A . В результате суточного вращения земли через 3 часа линия av займет положение $a_1\beta_1$, т. е. повернется относительно направления к звезде A на угол 45° . Через 6 часов линия av займет положение $a_2\beta_2$, т. е. повернется на 90° , и т. д.

Рисунок наглядно показывает, что на Северном полюсе полуденная линия вращается в пространстве со скоростью 15° в час в направлении справа налево, т. е. против часовой стрелки.

Осью вращения полуденной линии будет в данном случае ось земли, но лучше сказать вертикаль для точки наблюдения (на полюсе вертикаль и ось земли совпадают).

Таким образом, на Северном полюсе плоскость горизонта и полуденная линия ведут себя следующим образом:

- 1) плоскость горизонта сохраняет свое положение, т. е. не вращается в пространстве;
- 2) полуденная линия вращается в пространстве вокруг вертикали со скоростью 15° в час в направлении против часовой стрелки.

Рекомендуем читателю самостоятельно установить поведе-

ние плоскости горизонта и полуденной линии для Южного полюса.

На северной широте 45° . Выше мы уже установили, что вращение плоскости горизонта на экваторе имеет скорость 15° в час, а на полюсе вращения не имеет. Нетрудно сообразить, что по мере увеличения широты точки наблюдения скорость вращения плоскости горизонта будет непрерывно уменьшаться, стремясь превратиться в нуль на максимальной широте, т. е. на Северном (Южном) полюсе. При этом необходимо отметить, что осью вращения плоскости горизонта во всех случаях будет полуденная линия.

Таким образом, на широте 45° вращение плоскости горизонта будет происходить медленнее, чем на экваторе, но быстрее, чем на полюсе.

Можно сказать, что скорость вращения плоскости горизонта зависит от широты и пропорциональна *косинусу* широты. Обозначив угловую скорость вращения земли через ω , а угловую скорость плоскости горизонта через ω_1 , получаем равенство:

$$\omega_1 = \omega \cos \varphi.$$

Определим угловую скорость плоскости горизонта для широты 45° :

$$\omega = 15^\circ \text{ в час.}$$

$$\varphi = 45^\circ; \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707.$$

$$\omega_1 = 15^\circ \times 0,707 = 10^\circ 36' \text{ в час.}$$

Теперь рассмотрим вращение полуденной линии.

Мы уже видели, что на экваторе полуденная линия вращения не имеет, а на Северном полюсе вращается вокруг вертикали со скоростью, равной угловой скорости земли, причем направление вращения на Северном полюсе было против часовой стрелки. Направление вращения сохранится для широты 45° , но в данном случае можно сказать, что оно происходит с востока на запад. Нетрудно сообразить, что скорость вращения полуденной линии также будет зависеть от широты места, но пропорциональна не косинусу ее, а *синусу*. Обозначив угловую скорость земли через ω , а угловую скорость полуденной линии через ω_2 , можно написать равенство:

$$\omega_2 = \omega \sin \varphi.$$

Так как синус и косинус угла 45° равны, то, очевидно, скорость вращения полуденной линии на широте 45° будет равна скорости вращения плоскости горизонта на той же широте.

Таким образом, для точки любой северной широты вращение плоскости горизонта и полуденной линии в пространстве происходит следующим образом:

1) плоскость горизонта вращается вокруг полуденной линии со скоростью, пропорциональной косинусу широты;

2) полуденная линия вращается относительно вертикали в направлении с востока на запад со скоростью, пропорциональной синусу широты.

2. Гироскоп, его основное свойство и кажущееся движение

Гироскопом называют всякое тело, состоящее из однородного материала, имеющее возможность вращаться вокруг оси симметрии, причем эта ось может изменять свое положение относительно окружающих предметов.

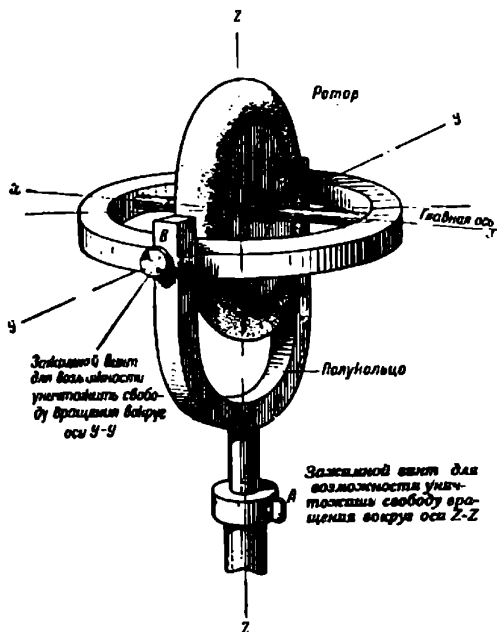


Рис. 6. Лабораторный гироскоп

вращающегося тела. Для лабораторных исследований обычно применяют гироскоп, состоящий из массивного диска (ротора), ось которого установлена в металлическом кольце. Это кольцо устанавливается в другое полукольцо (или кольцо), свободно вращающееся относительно вертикальной оси (рис. 6). Все перечисленные детали устанавливаются на массивной подставке.

Ось вращения диска (ротора) называется главной осью гироскопа или осью XX , ось вращения внутреннего кольца называется осью YY , а ось вращения полукольца (или кольца) — осью ZZ .

В дальнейших рассуждениях мы будем придерживаться приведенных обозначений.

Ось ротора установлена таким образом, что одновременно может вращаться относительно осей YY и ZZ , а следовательно,

Слово „гироскоп“ происходит от двух греческих корней: „гирос“, что значит вращение, и „скопейн“ — наблюдать¹. Следовательно, гироскопом называется прибор, при помощи которого можно наблюдать свойства вращающегося тела.

Для лабораторных исследований обычно применяют гироскоп, состоящий из массивного диска (ротора), ось которого установлена в металлическом кольце. Это кольцо устанавливается в другое полукольцо (или кольцо), свободно вращающееся относительно вертикальной оси (рис. 6). Все перечисленные детали устанавливаются на массивной подставке.

¹ Часто в литературе можно встретить слово „жироскоп“. Это слово — того же происхождения, но с французским произношением.

ротор может одновременно вращаться относительно всех трех осей. Установка, обеспечивающая телу одновременное вращение относительно трех осей, называется *карданов подвес*.

Гироскоп, отвечающий этому условию, называют гироскопом с тремя степенями свободы.

Если одну из осей карданова подвеса зажать, то получается гироскоп с двумя степенями свободы.

Существует понятие *свободный гироскоп*. Свободным гироскопом называется гироскоп:

- 1) имеющий три степени свободы;
- 2) все три оси которого пересекаются в одной точке;
- 3) центр тяжести которого находится в точке пересечения осей, т. е. в точке опоры;
- 4) в подшипниках осей которого должно быть обеспечено минимальное и равное трение (теоретически трение должно вообще отсутствовать).

Выполнение требований 2 и 3 называется балансировкой гироскопа. Из физики известно, что тело, помещенное таким образом, что его центр тяжести совпадает с точкой опоры, находится в безразличном равновесии.

Свободный гироскоп также должен находиться в безразличном равновесии, т. е. оставаться в том положении, какое ему было придано.

Самое понятие „свободный гироскоп“ предполагает, что гироскоп свободен от действия всякого рода внешних сил. Сила тяжести, конечно, будет действовать на гироскоп всегда, но если совместить центр тяжести гироскопа с точкой опоры, то плечо силы тяжести относительно точки опоры становится равным нулю, а значит, и момент силы тяжести также равен нулю.

Трение в подшипниках осей гироскопа также создает некоторый внешний момент относительно точки опоры гироскопа. Вот почему важно максимально уменьшить трение и уравнять его значение на противоположных подшипниках.

Если ротор свободного гироскопа имеет быстрое вращение, то гироскоп получает особое свойство. Главная ось его вращения (ось *XX*) стремится сохранить свое направление неизменным в мировом пространстве.

Если расположить ось гироскопа в каком-либо определенном положении по отношению к мировому пространству (направить на звезду) и сообщить ротору быстрое вращение, то с течением времени положение его оси по отношению к звезде не изменится. Для этого необходимо иметь идеально свободный гироскоп, т. е. такой, у которого выполнены все требования, перечисленные выше.

Во всех дальнейших рассуждениях мы будем иметь в виду именно такой идеально свободный гироскоп.

Сохраняя положение оси ротора неизменным в пространстве, гироскоп в силу вращения земли будет совершать так называемое кажущееся движение относительно земных предметов.

Это кажущееся движение может иметь различный характер, а поэтому рассмотрим последовательно три наиболее показательных случая.

I случай. Здесь мы рассмотрим, как будет происходить кажущееся движение гироскопа при его установке на географическом экваторе.

Предположим, что в начальный момент ось свободного гироскопа была расположена горизонтально (параллельно плоскости горизонта) и направлена с востока на запад (перпендикулярно к полуденной линии). На рис. 7 изображено положение

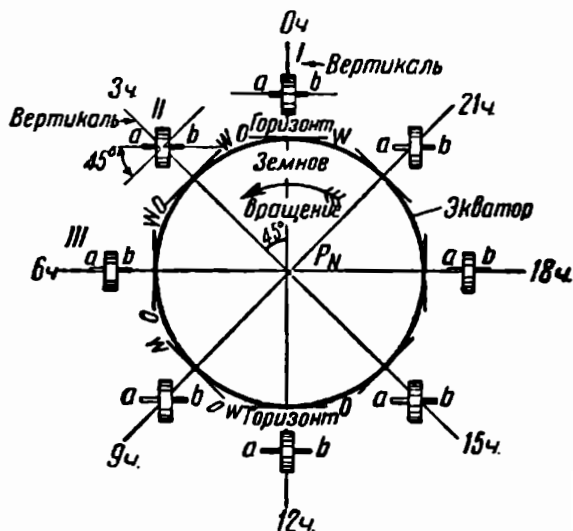


Рис. 7. Свободный гироскоп на экваторе

гироскопа, если смотреть на него из мирового пространства со стороны Северного полюса.

В начальный момент (0 часов) ось гироскопа ab горизонтальна и концом a направлена на восток. На основании своего свойства ось гироскопа будет сохранять положение в мировом пространстве. Плоскость же горизонта, как мы установили раньше, не сохраняет своего положения в пространстве, а совершает вращение со скоростью 15° в час. Таким образом, горизонтальность оси гироскопа не сможет сохраниться, и наблюдателю, находящемуся у гироскопа, будет казаться, что восточный конец оси гироскопа начнет подниматься над плоскостью горизонта со скоростью 15° в час и через 3 часа поднимется на 45° . Через 6 часов ось гироскопа станет вертикально, а через 12 часов вновь займет горизонтальное положение, причем конец ее a будет направлен на запад.

Через 24 часа положение восстановится, и ось гироскопа займет то же положение, т. е. станет горизонтально, и конец *a* вновь будет направлен на восток. Таким образом, ось гироскопа кажущимся движением совершит полный оборот относительно оси *УУ* с угловой скоростью, равной угловой скорости вращения земли.

Теперь установим ось гироскопа также горизонтально, но направим его с севера на юг, т. е. по полуденной линии. На рис. 8 изображено это положение для наблюдателя, находящегося в мировом пространстве над экватором. Как видно из рисунка, ось гироскопа при вращении земли не меняет своего положения по отношению к земле, т. е. все время горизонтальна и направлена с севера на юг. Объяснить это можно, вспомнив поведение полуденной линии для точки на экваторе. Действи-

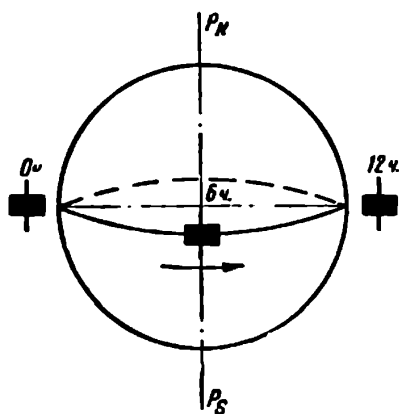


Рис. 8. Свободный гироскоп на экваторе

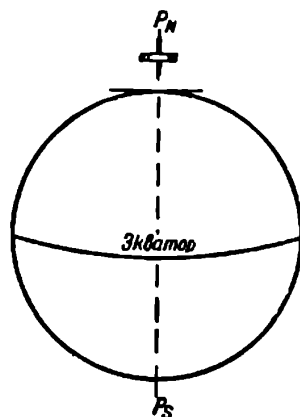


Рис. 9. Свободный гироскоп на Северном полюсе

тельно, полуденная линия на экваторе сохраняет свое положение в пространстве; совмещенная с ней ось гироскопа также сохраняет свое положение, а следовательно, вращение земли не изменит положения оси гироскопа. Таким образом, при вышеописанной установке ось гироскопа не обнаружит кажущегося движения.

II случай. Здесь мы рассмотрим, как будет происходить кажущееся движение оси гироскопа при установке его на одном из полюсов, допустим Северном.

Предположим, что в начальный момент ось гироскопа была расположена вертикально, т. е. перпендикулярно к плоскости горизонта.

На рис. 9. изображен этот случай для наблюдателя, расположенного в мировом пространстве над экватором.

Так как плоскость горизонта на полюсе вращения в пространстве не имеет, а мы расположили ось гироскопа к ней перпендикулярно, то, очевидно, вследствие основного свойства гироскопа угол 90° между плоскостью горизонта и осью гироскопа будет сохраняться, и кажущееся движение будет отсутствовать.

Теперь предположим, что ось гироскопа в начальный момент была горизонтальна, но направлена параллельно какой-то прямой, лежащей на плоскости горизонта, условно выбранной нами за полуденную линию.

На рис. 10 изображено это положение для наблюдателя, расположенного в мировом пространстве над Северным полюсом.

Пусть в начальный момент (0 часов) ось гироскопа ab совпала с линией AB (условно выбранная полуденная линия). В результате суточного вращения земли линия AB (как полуденная) будет совершать вращение вокруг вертикали и за 3 часа повернется на угол 45° .

Наблюдателю, находящемуся у гироскопа, будет казаться, что ось гироскопа повернулась на угол 45° в горизонтальной плоскости.

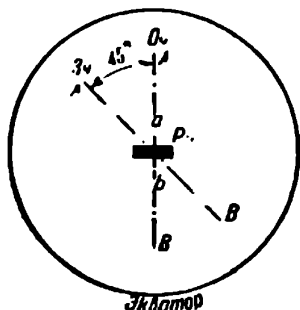


Рис. 10. Свободный гироскоп на Северном полюсе

Объяснить это явление можно тем, что наблюдатель, находящийся на Северном полюсе рядом с гироскопом, не воспринимая вращения полуденной линии, так как вращается и сам, заметит вращение оси гироскопа относительно земных предметов. Кажущееся вращение оси гироскопа на Северном полюсе будет происходить по ходу часовой стрелки, так как полуденная линия на Северном полюсе вращается против часовой стрелки, причем угловая скорость этого вращения будет равна угловой скорости вращения земли. Кроме того, отметим, что кажущееся движение будет происходить относительно оси ZZ гироскопа.

Если подобный случай рассмотреть для Южного полюса, то получится следующее:

1) при вертикальной установке ось гироскопа не обнаружит кажущегося движения;

2) при горизонтальной установке ось гироскопа будет иметь кажущееся движение в горизонтальной плоскости, в направлении против часовой стрелки, со скоростью, равной угловой скорости земли.

III случай. Здесь мы рассмотрим, как будет происходить кажущееся движение оси гироскопа, установленного на какой-либо широте φ . Этот случай наиболее важный, так как именно с таким положением приходится иметь дело в гироскопических приборах.

Предположим, что в начальный момент (0 часов) ось гироскопа ab была горизонтальна и направлена с севера на юг, т. е. по полуденной линии (рис. 11). В результате суточного вращения земли полуденная линия начнет своим северным концом отходить к западу, а следовательно, ось гироскопа своим концом a с той же скоростью будет поворачиваться к востоку. Попадая в восточную часть горизонта, которая, как известно, вращаясь в пространстве, опускается, конец a оси гироскопа будет подниматься над плоскостью горизонта. Южный конец оси b будет отходить к западу, а значит, и опускаться.

Так будет происходить кажущееся движение оси гироскопа для наблюдателя, находящегося у гироскопа.

Теперь рассмотрим положение, которое займет ось гироскопа через 6 часов (рис. 11). На рисунке видно, что ось гироскопа уже не направлена по полуденной линии, а образует с ней угол α . Кроме того, ось гироскопа, конечно, и не горизонтальна, а составляет с плоскостью горизонта некоторый угол. Здесь мы отметим, что кажущееся движение оси гироскопа происходило относительно осей YY и ZZ одновременно.

Через 12 часов ось гироскопа займет положение, изображенное на рис. 11.

Во-первых, мы видим, что ось гироскопа составляет с плоскостью горизонта угол 2φ . Таким образом, за 12 часов образовался максимальный угол между плоскостью горизонта и осью гироскопа.

В данном положении так же, как и в начальном (0 часов), ось гироскопа находится в плоскости меридиана, а это значит, что проекция оси гироскопа через 12 часов вновь совпадает с полуденной линией. Таким образом, в результате суточного вращения земли ось гироскопа опишет конус с вершиной в центре ротора, причем угол при вершине конуса будет зависеть от первоначальной установки гироскопа.

В приведенном на рис. 11 случае угол при вершине конуса, описанного осью гироскопа, равен двойной широте места установки. Однако это бывает только в тех случаях, когда ось гироскопа в начальный момент установлена горизонтально и направлена по полуденной линии. Для подтверждения этого вспомним уже известные нам случаи, а именно:

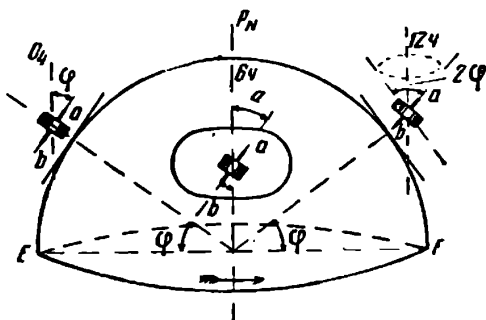


Рис. 11. Свободный гироскоп на широте φ

1. При подобной установке на экваторе ось гироскопа кажущегося движения не обнаруживала. Широта экватора равна нулю, угол при вершине конуса должен был быть равен так же нулю, а следовательно, конус сольется с прямой.

2. При подобной установке на полюсе, т. е. на широте 90° , ось гироскопа описывала круг, т. е. конус с углом при вершине 180° .

Для общего же случая установки оси гироскопа в начальный момент удобнее следующее правило. Ось гироскопа описывает своим кажущимся движением конус, угол при вершине которого равен двойному углу между осью гироскопа и осью земли. Таким образом, независимо от места установки гироскопа на земле, кажущееся движение будет зависеть только от угла, образованного направлением оси гироскопа и осью земли. Вернемся

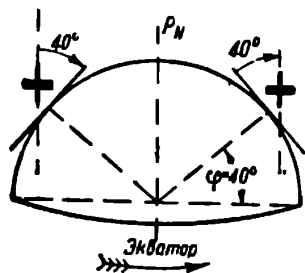


Рис. 12. Свободный гироскоп на широте 40° . (Ось параллельна оси земли.)

к рис. 11 и рассмотрим момент, соответствующий 0 часов. Нетрудно заметить, что угол φ , образованный осью гироскопа и линией, параллельной оси земли, равен широте места.

В этом случае, как мы уже говорили, ось гироскопа опишет конус. Теперь обратимся к рис. 12. Этот рисунок изображает гироскоп, установленный на широте 40° , причем северный конец оси гироскопа составляет с плоскостью горизонта угол 40° , т. е. равный широте.

Из рисунка видно, что в этом случае ось гироскопа параллельна оси земли, а значит, угол между ними равен нулю. Нетрудно сообразить, что в данном случае никакого кажущегося движения не обнаружится, и наблюдатель скажет: „Ось гироскопа неподвижна относительно земных предметов.“

Отсюда можно сделать вывод, что в любом месте земли можно установить гироскоп так, что никакого кажущегося движения не обнаружится.

Однако, это обстоятельство имеет лишь теоретическое значение и в практическом применении гироскопа в авиаприборах не используется.

Для практического применения ось гироскопа располагается, как правило, либо горизонтально, либо вертикально и для широт больше нуля и меньше 90° никогда не займет положения, параллельного оси земли. Таким образом, все свободные гироскопы будут иметь кажущееся движение, причем оно будет происходить относительно осей ZZ и YY одновременно. Установим зависимость между угловой скоростью кажущегося движения и широтой места. Для этого необходимо вспомнить зависимость угловой скорости вращения плоскости горизонта и полуденной линии от широты места. Формулы, при-