

В. П. КОЖУХОВ, В. В. ВОРОНОВ, В. В. ГРИГОРЬЕВ

Девияция магнитного компаса

ВВЕДЕНИЕ

Магнитный компас занимает особое место среди современных технических средств судовождения. Этот древний прибор, переживший не одно тысячелетие, до сих пор широко применяется на всех флотах мира. Это объясняется тем, что магнитный компас обладает достоинствами, которые свойственны очень немногим приборам, применяемым в судовождении.

Магнитный компас прост в обращении, доступен каждому штурману и не требует специального обслуживающего персонала. Действует он автономно, т. е. независимо от силовых установок, что очень важно в судовых условиях.

Магнитный компас сравнительно дешев и, что самое главное, надежен в работе. При надлежащем уходе он может прослужить столько, сколько существует само судно. Безотказность действия любого прибора вообще является очень ценным качеством. Особенно это важно для курсоуказателя.

Пока судно в море, курсоуказатель не должен выходить из строя ни на одну минуту, иначе судно теряет ориентировку и лишается возможности продолжать путь. По существующим правилам ни одно самоходное судно, какими бы новейшими техническими средствами они ни были оборудованы, не может быть выпущено в море, если на этом судне отсутствует магнитный компас.

Изучение магнитного компаса как прибора, овладение правилами технической его эксплуатации на судне являются неотъемлемой частью подготовки инженера-судоводителя.

Каждый судоводитель должен уметь определить девиацию магнитного компаса, и, если она велика, уметь уничтожить ее.

Магнитный компас, как и всякий другой прибор, совершенствуется и видоизменяется. Знать, в каком направлении должно идти развитие прибора, и уметь технически грамотно сформулировать требования к промышленным предприятиям, выпускающим этот прибор, — одна из основных задач инженера-судоводителя. Настоящий учебник дает основы этих знаний.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНЕТИЗМЕ

§ 1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Магнетизм проявляется во взаимном притяжении или отталкивании намагниченных тел, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Это происходит вследствие того, что каждое такое тело создает в окружающем его пространстве магнитное поле, которое представляет собой особый вид материи, обладающей свойством передавать с определенной силой действие одних намагниченных тел на другие.

За количественную характеристику магнитного поля принимается сила взаимодействия, которая обнаруживается между намагниченными телами.

Впервые количественная характеристика магнитного поля была дана Кулоном. Он установил, что взаимодействие двух количеств магнетизма m_1 и m_2 , сосредоточенных в двух элементах объема намагниченных тел, пропорционально произведению этих количеств и обратно пропорционально квадрату расстояния r между ними. Это взаимодействие направлено по линии, соединяющей рассматриваемые элементы, и представляет собой взаимное притяжение, когда оба магнетизма разноименны, и взаимное отталкивание, когда они одноименны. Закон Кулона выражается формулой

$$F = \frac{m_1 m_2}{r^2}. \quad (1)$$

Если m_1 и m_2 даны в абсолютных электромагнитных единицах, а r — в сантиметрах, то сила взаимодействия F будет выражена в динах.

В формуле (1) подразумевается, что промежуточной средой между взаимодействующими количествами магнетизма является воздух, который характеризуется магнитной проницаемостью, равной единице. Сила взаимодействия в другой среде будет во столько раз меньше, во сколько магнитная проницаемость данной среды больше единицы. Если одно из взаимодействующих количеств магнетизма m_1 или m_2 принять равным единице, то сила взаимодействия между ними

$$H = \frac{m}{r^2}. \quad (2)$$

Эта сила носит название напряженности магнитного поля и является его основной характеристикой.

Таким образом, напряженность магнитного поля есть сила, испытываемая единицей количества магнетизма ($m = 1$), помещенной в данную точку. За единицу количества магнетизма принимается магнетизм положительного, северного наименования.

В формуле (2), по аналогии с формулой (1), m выражено в абсолютных электромагнитных единицах, r — в сантиметрах, но H в отличие от величины F — в эрстедах. Следовательно, напряженность поля будет равна 1 э, если единица количества магнетизма будет испытывать силу взаимодействия, равную 1 дн.

В Международной системе единиц (СИ) напряженность магнитного поля выражается в амперах на метр, т. е.

$$1 \text{ а/м} = 4\pi 10^{-3} \text{ э}$$

или

$$40 \text{ а/м} \approx 0,5 \text{ э}.$$

Напряженность лучше характеризует магнитное поле, чем сила взаимодействия, выраженная формулой (1). В выражении напряженности (2) одна из взаимодействующих величин всегда постоянна и равна единице. Этим устраняется неопределенность, которая наблюдается при пользовании формулой (1).

И действительно, в формуле (1) сила взаимодействия зависит от того, с каким количеством магнетизма m_2 мы входим в соприкосновение с m_1 , и поэтому трудно сказать, насколько интенсивно поле, источником которого является магнетизм m_1 .

Помимо векторной величины — напряженности, магнитное поле может также характеризоваться скалярной величиной.

За такую характеристику поля принимается не сила взаимодействия, как это было принято ранее, а работа, которую необходимо затратить, преодолевая эту силу при перемещении единицы северного магнетизма с бесконечно большого расстояния в рассматриваемую точку поля.

Величина, численно равная этой работе, получила название *магнитного потенциала* U , или потенциала магнитного поля.

В механике работа A выражается скалярным произведением силы f на путь s :

$$dA = (f ds).$$

Применяя это выражение к понятию магнитного потенциала, сделаем замену в соответствии с принятыми ранее обозначениями:

$$dA = dU; \quad f = H; \quad \cos(\hat{f}s) ds = dr.$$

Следовательно, магнитный потенциал может быть выражен так:

$$dU = -H dr. \quad (3)$$

Знак минус здесь поставлен потому, что работа при перемещении из бесконечности должна затрачиваться на преодоление силы, т. е. совершаться против силы H .

Если в этом выражении значение напряженности H заменить в соответствии с формулой (2), то получим дифференциальное уравнение вида

$$dU = -m \frac{dr}{r^2}, \quad (4)$$

где m — постоянная величина.

Интегрируя это уравнение в пределах от ∞ до r

$$U = -m \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = \frac{m}{r} \Big|_{\infty}^r,$$

будем иметь выражение потенциала магнитного поля, обусловленного магнетизмом одного наименования, сосредоточенным в элементе объема намагниченного тела:

$$U = \frac{m}{r}. \quad (5)$$

В более общем случае векторы H и dr в формуле (3) можно представить через их проекции на координатные оси x, y, z :

$$\begin{aligned} \vec{H} &= X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}, \\ d\vec{r} &= dx\vec{i} + dy\vec{j} + dz\vec{k}, \end{aligned}$$

а затем оба эти вектора скалярно перемножить, помня, что $\vec{i}\vec{i} = 1$, $\vec{i}\vec{j} = 0$ и т. п. Тогда можно получить значение магнитного потенциала в таком виде:

$$dU = -Xdx - Ydy - Zdz,$$

где X, Y, Z — составляющие напряженности магнитного поля по координатным осям x, y, z .

Рассматривая это выражение как дифференциал функции трех переменных, можно установить следующую общую связь между напряженностью и потенциалом магнитного поля:

$$\left. \begin{aligned} X &= -\frac{\partial U}{\partial x} \\ Y &= -\frac{\partial U}{\partial y} \\ Z &= -\frac{\partial U}{\partial z} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Эта очень важная связь, характеризующая собой класс так называемых потенциальных функций, широко используемых в решении

многих задач науки и техники, может быть сформулирована так: частные производные от магнитного потенциала, взятые по переменным x, y, z со знаком минус, выражают величины проекций напряженности магнитного поля в данной точке $p(x, y, z)$ на соответствующие координатные оси.

§ 2. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО МАГНИТА

До сих пор при рассмотрении действия магнетизма одного наименования считалось, что в природе возможен такой магнит, который обладает магнетизмом одного северного наименования или одного южного. Такой подход к рассматриваемому явлению удобен в том отношении, что он ведет к упрощению многих понятий и выводов, связанных с магнитным полем. Однако известно, что магнетизм всегда биполярен, т. е. каждый магнит, как бы он мал или велик ни был, обладает двумя полюсами, в которых сосредоточено равное количество магнетизма двух различных наименований.

Возникает вопрос: как найти выражение напряженности магнитного поля такого магнита?

В качестве примера рассмотрим магнит в виде прямолинейного продолговатого бруска. Такая форма магнитов принята в компасном деле и поэтому представляет наибольший интерес. При этом рассмотрим напряженность магнитного поля магнита в двух точках (рис. 1): в точке p_1 , находящейся на продолжении оси магнита, и в точке p_2 , которая находится на линии, перпендикулярной этой оси и проходящей через центр магнита.

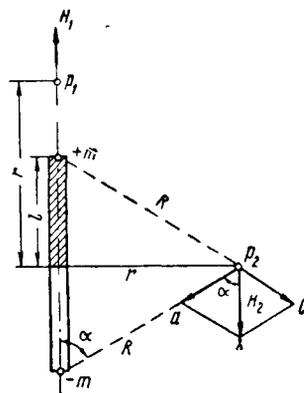


Рис. 1

Весь магнетизм магнита условимся считать сосредоточенным в двух крайних точках, находящихся на его концах. Такое допущение приводит к понятию *схематического магнита* в отличие от существующих в природе магнитов *физических*.

У физических магнитов магнетизм распределен по всему объему и больше всего он проявляется не на концах магнита, как это имеет место у магнита схематического, а вблизи них, в точках, называемых *полюсами*.

Понятием схематического магнита пользуются для упрощения вывода формул, хотя сами формулы в окончательном их виде будут аналогичны тем формулам, которые можно было бы получить на основании более строгого их вывода применительно к физическому магниту.

Итак, представим себе схематический магнит длиной $2l$, на концах которого сосредоточено равное количество магнетизма двух на-

именований: $+m$ и $-m$ (см. рис. 1). Найдем напряженность магнитного поля H_1 , в точке p_1 , находящейся на продолжении оси магнита на расстоянии r от его середины.

Сначала рассмотрим действие ближайшего к точке p_1 полюса магнита с количеством магнетизма $+m$. В соответствии с законом Кулона это действие в указанной точке выразится напряженностью $\frac{m}{(r-l)^2}$.

Действие второго, удаленного полюса в соответствии с тем же законом будет равно $-\frac{m}{(r+l)^2}$.

Совместное действие полюсов представится в виде алгебраической суммы этих двух выражений — напряженностей магнитных полей обоих полюсов магнита:

$$H_1 = \frac{m}{(r-l)^2} - \frac{m}{(r+l)^2}. \quad (7)$$

Алгебраическое суммирование производится потому, что оба полюса и точка, в которой ищется значение поля, лежат на одной прямой, т. е. векторы обеих напряженностей составляют одну прямую линию.

Формулой (7) исчерпывается принципиальная сторона вывода. Упростим эту формулу, приведя правую ее часть к общему знаменателю:

$$H_1 = \frac{4mlr}{(r^2 - l^2)^2};$$

вынесем r^2 за скобки и произведем сокращение:

$$H_1 = \frac{4ml}{r^3 \left(1 - \frac{l^2}{r^2}\right)^2};$$

обозначив $2ml = M$, получим выражение напряженности магнитного поля схематического магнита в точке, находящейся на продолжении его оси на расстоянии r от центра:

$$H_1 = \frac{2M}{r^3} \frac{1}{\left(1 - \frac{l^2}{r^2}\right)^2}. \quad (8)$$

Величина M является произведением количества магнетизма m , сосредоточенного на концах магнита, на длину этого магнита $2l$. Поэтому, по аналогии с понятием, введенным в механике, величина M получила название *магнитного момента* магнита.

Формула (8) в применении к схематическому магниту дает точное выражение напряженности. Однако очень часто эту формулу заменяют другой, более удобной для расчетных целей.

Если рассматривать поле на расстоянии r , значительно большем полудлины магнита l , то дробь $\frac{1}{\left(1 - \frac{l^2}{r^2}\right)^2}$ можно разложить в биномиальный ряд вида

$$(1+x)^m = 1 + \frac{m}{1!}x + \frac{m(m-1)}{2!}x^2 + \dots$$

и ограничиться первыми членами разложения

$$\left(1 - \frac{l^2}{r^2}\right)^{-2} = 1 + 2\frac{l^2}{r^2}.$$

Для практических целей этого бывает вполне достаточно. После разложения формула (8) примет такой вид:

$$H_1 = \frac{2M}{r^3} \left(1 + \frac{P}{r^2}\right), \quad (9)$$

где $2l^2 = P$.

Эта формула будет тем точнее, чем полудлина магнита l будет меньше расстояния r .

Иногда величина $\frac{2l^2}{r^2}$ по сравнению с единицей бывает настолько мала, что, пренебрегая ею, можно пользоваться формулой

$$H_1 = \frac{2M}{r^3}. \quad (10)$$

Теперь перейдем к решению второй задачи.

Найдем напряженность H_2 магнитного поля магнита в точке p_2 , находящейся на перпендикуляре к оси магнита, восстановленном из его центра. Расстояние от центра магнита до точки p_2 примем равным r (см. рис. 1).

На рисунке отрезок H_2 является геометрической суммой двух других отрезков — $\overline{p_2a}$ и $\overline{p_2c}$, каждый из которых выражает собой напряженность магнитного поля в точке p_2 , вызванного соответственно количеством магнетизма ($-m$) и ($+m$), сосредоточенным в полюсах магнита. Эти напряженности по абсолютному значению равны между собой и каждая из них равняется $\frac{m}{R^2}$, где R — расстояние от точки p_2 до полюсов магнита.

Следовательно, из подобных треугольников $(+m)p_2(-m)$ и p_2ab можно найти

$$H_2 : 2l = \frac{m}{R^2} \cdot R.$$

Отсюда

$$H_2 = \frac{2ml}{R^3}.$$

Произведя в этой формуле замену R на $\sqrt{r^2 + l^2}$ и $2ml$ на M , получим выражение напряженности магнитного поля в точке, находящейся на перпендикуляре к оси магнита, восстановленном из его середины:

$$H_2 = \frac{M}{(r^2 + l^2)^{3/2}}. \quad (11)$$

Формула (11) — точная формула для расчета поля схематического магнита, но по аналогии с формулой (8) заменим ее выражением, более удобным для применения на практике.

Для этого перепишем ее так:

$$H_2 = \frac{M}{r^3} \frac{1}{\left(1 + \frac{l^2}{r^2}\right)^{\frac{3}{2}}},$$

а затем, как в предыдущем случае, разложим второй сомножитель в ряд. Если условимся, как прежде, что расстояние r значительно больше полудлины магнита l , то ряд будет быстро сходящимся. Так что можно ограничиться первыми двумя членами разложения:

$$\left(1 + \frac{l^2}{r^2}\right)^{-\frac{3}{2}} = 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{l^2}{r^2}.$$

Поэтому формула (11) окончательно примет вид:

$$H_2 = \frac{M}{r^3} \left(1 - \frac{Q}{r^2}\right), \quad (12)$$

где $\frac{3}{2} l^2 = Q$.

Если величина $\frac{3l^2}{2r^2}$ становится настолько малой по сравнению с единицей, что ею можно пренебречь, то

$$H_2 = \frac{M}{r^3}. \quad (13)$$

В заключение обоих выводов необходимо сделать следующие замечания.

1. Как было сказано, формулы напряженности магнитного поля схематического магнита аналогичны подобным же формулам физического магнита. Разница состоит только в том, что величины P и Q для физического магнита зависят не только от его размеров, но также и от характера распределения в нем магнетизма. Эти величины, получившие название *коэффициентов распределения*, при расчете полей определяются опытным путем.

2. Напряженность магнитного поля, источником которого является магнетизм одного наименования, в соответствии с законом Кулона изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния.

Напряженность же поля магнита (магнетизм двух различных наименований), как показывают формулы (10) и (13), меняется обратно пропорционально кубу расстояния. Это очень важно знать при работе с магнитами. Так, если расстояние до магнита уменьшить вдвое, то напряженность поля магнита возрастет в восемь раз.

3. Формулы (10) и (13) показывают также, что если ось элементарного магнита совместить с направлением на данную точку, а затем повернуть магнит на угол 90° к первоначальному его направлению, оставляя расстояние r неизменным, то напряженность магнитного поля в данной точке уменьшится от этого поворота вдвое.

§ 3. НАМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ

В природе все тела обладают магнитными свойствами. Но из всего многообразия тел следует выделить отдельную группу, куда войдут тела, у которых эти свойства проявляются в наибольшей степени. Эти тела получили название *ферромагнитных*. Вещества, из которых состоят ферромагнитные тела, носят название ферромагнитных веществ, или ферромагнитных материалов (в технике).

Степень намагничивания всякого тела, в том числе и ферромагнитного, характеризуется величиной, получившей название *намагниченности* (J), которая определяется как магнитный момент тела, отнесенный к единице объема, т. е.

$$J = \frac{dM}{dv}.$$

Подобно магнитному моменту намагниченность является векторной величиной.

Из соотношения, связывающего обе величины — магнитный момент и намагниченность, можно получить выражение магнитного момента элементарного магнита:

$$dM = Jdv. \quad (14)$$

Чтобы найти магнитный момент намагниченного тела конечных размеров, нужно проинтегрировать это уравнение по объему. Но для этого необходимо знать закон распределения вектора I внутри тела, т. е. его выражение как функции координат точек данного тела. Решение этой задачи науке известно для очень ограниченного числа тел. Поэтому магнитные моменты магнитов определяются опытным путем.

Если предположить, что вектор I в каждой точке данного тела есть величина постоянная, не зависящая от координат точек, то такое тело будет считаться равномерно намагниченным, или *однородно намагниченным*.

При этом условии уравнение (14) имеет простое решение:

$$M = Jv. \quad (15)$$

По смыслу это выражение подобно равенству

$$M = 2ml,$$

которым мы пользовались в предыдущем параграфе. Разница состоит только в том, что это равенство представляет собой магнитный момент схематического магнита, а выражением (15) определяется магнитный момент физического магнита.

Для однородного намагничивания тела требуются следующие условия: 1) однородность в магнитном отношении материала, из которого изготовлено тело; 2) однородность внешнего намагничивающего поля; 3) тело по своей форме должно представлять собой поверхность второго порядка (шар, эллипсоид).

Конечно, удовлетворить всем этим требованиям на практике не всегда возможно. Если же тело обладает слабой намагниченностью, то часто его считают однородно намагниченным, независимо от формы и степени однородности материала, из которого оно состоит.

Как увидим дальше, подобным образом рассуждают в теории девиации магнитного компаса.

Намагниченности было дано пока лишь формальное определение. Не был затронут вопрос о том, от каких причин она зависит, т. е. что нужно сделать, чтобы повысить намагниченность того или иного тела или, наоборот, ослабить ее.

В решении этого вопроса кажется вполне естественным предположить, что намагниченность должна находиться в зависимости от напряженности намагничивающего поля, т. е. чем больше напряженность поля, тем выше намагниченность, и наоборот.

Эта зависимость математически выражается так:

$$J = \kappa' H, \quad (16)$$

где κ' — магнитная восприимчивость тела.

Магнитная восприимчивость тела в свою очередь зависит от магнитных свойств материала, из которого оно изготовлено и, кроме того, от формы самого тела. Эта зависимость имеет вид:

$$\kappa' = \frac{\kappa}{1 + \kappa N},$$

где κ — магнитная восприимчивость материала;
 N — коэффициент размагничивания.

Коэффициент размагничивания для тел различных форм принимает разные значения. И даже в одном и том же теле по разным его направлениям он имеет разную величину. Исключение составляет только шар, для которого коэффициент размагничивания — величина постоянная, равная $\frac{4}{3}\pi$.

Разные значения коэффициента размагничивания по разным направлениям внутри тела приводят к тому, что вектор намагничен-

ности J не совпадает с вектором напряженности внешнего намагничивающего поля H . Вектор намагниченности как бы преломляется на больший или меньший угол относительно вектора напряженности. Если же тело имеет удлиненную форму, то вектор намагниченности внутри этого тела почти совпадает с направлением продольной его оси, под каким бы углом к этой оси (кроме 90°) не было направлено намагничивающее поле. В этом случае говорят, что направление намагниченности не зависит от направления намагничивающего поля.

Опыт показывает, что все тела продолговатой формы намагничиваются так, что их магнитные полюсы располагаются очень близко от концов их продольных осей, независимо от направления намагничивающего поля. Исключение составляет только случай, когда вектор напряженности намагничивающего поля перпендикулярен продольной оси тела.

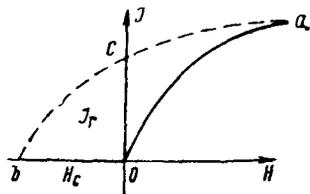


Рис. 2

Тогда намагничивание происходит в поперечном направлении тела, но вследствие большого коэффициента размагничивания в этом направлении тело практически можно считать не намагниченным. Так, например, железный брусок эллипсоидальной формы, у которого отношение большой оси к малой равно 15, имеет способность намагничиваться по поперечной оси в 55 раз слабее, чем в продольном направлении.

Выше было установлено, что намагниченность ферромагнитных тел зависит от формы тела и магнитной восприимчивости материала, из которого оно изготовлено. Магнитная восприимчивость ферромагнитных материалов, в свою очередь, также не остается постоянной и находится в зависимости от условий, в которых происходит намагничивание. Она зависит от температуры тела, напряженности намагничивающего поля и механического воздействия, которому подвергается тело в процессе намагничивания.

Зависимость магнитной восприимчивости от напряженности намагничивающего поля показана на рис. 2, где по горизонтальной оси отложены значения напряженности намагничивающего поля H , а по вертикальной — намагниченность J . На отрезке кривой Oa , называемой *основной кривой намагничивания*, видно, что при увеличении напряженности поля намагниченность меняется нелинейно. Следовательно, коэффициент κ' в формуле (16), выражающей закон намагничивания, представленный кривой Oa , есть величина переменная.

Ранее было установлено, что коэффициент κ' для тел заданной формы зависит исключительно от магнитной восприимчивости материала, из которого изготовлено тело. Отсюда следует, что нелинейность кривой намагничивания ферромагнитного тела обусловлена изменением магнитной восприимчивости материала под влиянием намагничивающего поля.

Увеличение напряженности поля приводит к тому, что кривая намагничивания становится параллельной оси абсцисс. Дальнейшего изменения намагниченности здесь не наблюдается. Тело как бы утратило магнитную восприимчивость — оно намагнитилось до насыщения.

При уменьшении напряженности поля намагниченность меняется не по той кривой, по которой до этого шло ее изменение, а по другой, показанной на рис. 2 пунктиром и называемой *гистерезисной кривой*.

Следовательно, магнитная восприимчивость ферромагнитного материала зависит не только от напряженности намагничивающего поля, но также от магнитного состояния, в котором находилось тело, в частности, от того, было оно до этого намагничено или нет.

Продолжая уменьшать напряженность намагничивающего поля и доведя ее до нуля, замечаем, что тело сохраняет состояние намагниченности даже в том случае, когда намагничивающее поле равно нулю. Это состояние тела носит название остаточной намагниченности (J_r). Обладая остаточной намагниченностью, тело становится самостоятельным источником магнитного поля, т. е. магнитом.

Все ранее сказанное приводит к убеждению, что формула (16) не полностью отражает процесс намагничивания ферромагнитных тел. Если в этой формуле положить $H = 0$, то $J = 0$. В действительности же, как мы только что убедились, в ферромагнитных телах наблюдается остаточная намагниченность.

Чтобы в формуле (16) устранить замеченное несоответствие, ее следует дополнить слагаемым J_r , которое представляет собой остаточную намагниченность. Тогда

$$J = \kappa' H + J_r. \quad (17)$$

Формула (17) полнее отражает процесс намагничивания ферромагнитных тел. Если напряженность намагничивающего поля H становится равной нулю, т. е. если намагничивающее поле прекращает действовать, то в соответствии с формулой (17) тело продолжает еще проявлять магнитные свойства и тогда $J = J_r$.

Из рассмотрения кривой намагничивания видно, что для уничтожения остаточного магнетизма необходимо подвергнуть тело действию магнитного поля противоположного направления (см. рис. 2). При напряженности поля, выраженной отрезком Ob , намагниченность обращается в нуль. Напряженность поля, при которой остаточная намагниченность J_r становится равной нулю, называется *коэрцитивной силой* H_c .

Коэрцитивная сила является одной из характеристик магнитных свойств ферромагнитных материалов. Ею, в частности, характеризуется степень *жесткости* материала в магнитном отношении. Чем больше коэрцитивная сила, тем упорнее держится в намагниченном теле остаточная намагниченность J_r , тем, следовательно, жестче в магнитном отношении материал.

При незначительной коэрцитивной силе остаточный магнетизм, как бы он ни был велик, быстро исчезнет и тело размагничивается.

В этом случае говорят, что материал, из которого изготовлено тело, является *мягким* в магнитном отношении.

Ниже приводятся величины коэрцитивной силы для некоторых ферромагнитных материалов.

Платино-кобальтовый сплав	2600—4000 э
Сталь Магнико	550 »
Сплав Викаллой	290—500 »
Кобальтовая сталь	100—240 »
Железо Армко	0,8 »
Сплав Пермаллой	0,03 »

Резкую границу между жесткими и мягкими в магнитном отношении материалами провести трудно. Однако считается, что для группы мягких материалов коэрцитивная сила должна быть меньше 2—3 э, а для жестких больше 20—30 э.

Мягкие в магнитном отношении материалы широко используются в электротехнической промышленности для изготовления трансформаторов, динамомашин и т. п., а также применяются в качестве датчиков магнитометрических приборов.

Жесткие материалы идут на изготовление постоянных магнитов. Но в этом случае они должны обладать еще одним важным качеством: кроме большой коэрцитивной силы у них должна быть большая остаточная намагниченность. Только тогда имеет смысл использовать этот материал для изготовления постоянных магнитов.

Обе величины — остаточная намагниченность и коэрцитивная сила — важные характеристики магнитных сталей.

§ 4. МАГНИТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ОДНОРОДНО НАМАГНИЧЕННОГО ТЕЛА

Магнитный потенциал любого намагниченного тела можно рассматривать как сумму потенциалов элементарных магнитов, распределенных по всему телу.

Допустим, что тело, имеющее объем v , намагничено по какому угодно закону.

Выделим внутри этого тела элементарный магнит длиной $2dl$, на концах которого сосредоточен магнетизм $+m$ и $-m$ (рис. 3). Поставим задачу найти магнитный потенциал в точке $p(x_p, y_p, z_p)$.

Введем обозначения:

θ — угол между осью элементарного магнита и направлением из его центра на выбранную точку p ;

r — расстояние от центра $O(x_0, y_0, z_0)$ магнита до точки p ;

и r_1 и r_2 — расстояния от концов магнита до той же точки p .

Потенциал магнитного поля, источ-

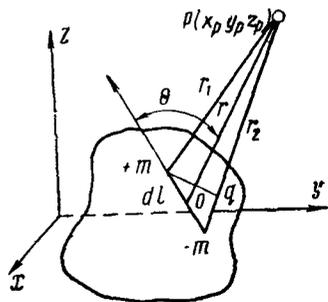


Рис 3

ником которого является магнетизм $+m$, сосредоточенный на одном конце магнита, для точки p может быть найден по формуле (5)

$$U_1 = \frac{m}{r_1}.$$

Потенциал же, обусловленный магнетизмом $-m$, сосредоточенным на другом конце магнита, в той же точке p

$$U_2 = -\frac{m}{r_2}.$$

Общее значение потенциала элементарного магнита выразится алгебраической суммой

$$dU = \frac{m}{r_1} - \frac{m}{r_2}.$$

Произведем преобразование:

$$dU = m \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}.$$

Так как расстояние r от элементарного магнита до точки p весьма велико по сравнению с длиной магнита $2dl$, то прямые \overline{mp} , \overline{Op} и $-\overline{mp}$ можно считать параллельными друг другу, а отрезок $+mq$ — перпендикуляром к ним.

Тогда получим (см. рис. 3)

$$r_2 - r_1 = 2dl \cos \theta.$$

Положим далее $r_1 r_2 = r^2$. Осуществив эту замену в выражении dU , будем иметь

$$dU = \frac{2mdl}{r^2} \cos \theta.$$

В соответствии с принятыми ранее обозначениями произведение $2mdl$ равно магнитному моменту dM элементарного магнита, а магнитный момент на основании формулы (14)

$$dM = J dv.$$

где J — намагниченность магнита;

dv — его объем.

Поэтому потенциал элементарного магнита (диполя) может быть представлен в виде

$$dU = \frac{J dv}{r^2} \cos \theta.$$

Преобразуем правую часть этого уравнения. Для этого воспользуемся соотношением

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \right) = -\frac{1}{r^2},$$

которое выражает собой производную частного. Тогда после подстановки уравнение примет вид

$$dU = -J \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \right) \cos \theta dv. \quad (18)$$

Замечаем, что угол θ образован вектором намагниченности J диполя и радиусом-вектором r . Поэтому произведение двух векторов J и $\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \right)$ на косинус угла между ними в уравнении (18) представляет собой не что иное, как скалярное произведение этих векторов.

Напишем это произведение в сокращенной форме:

$$dU = - \left(\bar{J} \frac{d \left(\frac{1}{r} \right)}{dr} \right) dv. \quad (19)$$

Знак минус перед скалярным произведением имеет вполне определенный смысл. Он указывает на то, что производная берется не по направлению радиуса-вектора r , которое считается от точки O к точке p (см. рис. 3), а в обратном направлении: от точки p к точке O . Обе эти точки как бы поменялись местами. Если по смыслу задачи операцию дифференцирования следовало бы производить по координатам точки $O(x_0, y_0, z_0)$, находящейся внутри данного тела, то с переменной знака производной эта операция как бы переносится в точку $p(x_p, y_p, z_p)$ и производится по координатам этой точки.

Представим радиус-вектор r в функции координат обеих точек:

$$r = \sqrt{(x_p - x_0)^2 + (y_p - y_0)^2 + (z_p - z_0)^2}.$$

Продифференцируем выражение $\frac{1}{r}$ сначала по переменной x_p , а потом по другой переменной — x_0 .

В результате убедимся, что

$$\frac{\partial}{\partial x_p} \left(\frac{1}{r} \right) = - \frac{\partial}{\partial x_0} \left(\frac{1}{r} \right),$$

т. е. при замене переменных, по которым ведется дифференцирование, изменится только знак производной, сама же производная останется без изменений. Этот вывод позволяет упростить решение уравнения (19).

Чтобы найти значение потенциала всего намагниченного тела, а не отдельного его элемента, нужно взять интеграл правой части уравнения (19) по всему объему тела:

$$U = - \int_v \left(\bar{J} \frac{d \left(\frac{1}{r} \right)}{dr} \right) dv.$$

Интегрирование этого выражения невозможно, если неизвестна аналитическая связь вектора J с координатами точек данного тела. Другими словами, для интегрирования этого уравнения нужно знать закон намагничивания тела.

Проще всего предположить, что тело намагничено однородно, т. е. намагниченность во всех точках тела сохраняет постоянную величину и направление: $J = \text{const}$.

Выведем J за знак интеграла, тогда

$$U = - \left(\bar{J} \int_v \frac{d \left(\frac{1}{r} \right)}{dr} dv \right).$$

Так как интегрирование производится по объему, а операция дифференцирования подынтегральной функции — по координатам точки p , то эти действия можно осуществлять в каком угодно порядке. Сначала можно произвести интегрирование, а затем дифференцирование. Тогда предыдущее выражение может быть представлено так:

$$U = - \left(\bar{J} \frac{d}{dr} \int_v \frac{dv}{r} \right).$$

Интеграл вида $\int \frac{dv}{r}$ выражает собой гравитационный потенциал тела данного объема, если принять, что плотность вещества, из которого состоит тело, равна единице во всех его точках.

Но так как ферромагнитное тело обладает иной плотностью, не равной единице, то интеграл, который обозначим V , будет пропорционален гравитационному потенциалу тела и численно будет во столько раз меньше, во сколько средняя плотность вещества, заполняющего объем данного тела, будет больше единицы.

Окончательно магнитный потенциал однородно намагниченного тела примет вид

$$U = - \left(\bar{J} \frac{dV}{dr} \right). \quad (20)$$

Радиус-вектор r совпадает с направлением наибольшего изменения функции. Производная по этому направлению связана с понятием градиента. Воспользовавшись этим понятием, дадим словесную формулировку выражению (20).

Магнитный потенциал однородно намагниченного тела равен со знаком минус скалярному произведению вектора намагниченности тела на градиент потенциала сил притяжения, созданного массой данного тела. При этом плотность вещества, заполняющего объем данного тела, во всех его точках равна единице.

Выражение магнитного потенциала (20) справедливо для любой точки $p(x_p, y_p, z_p)$ пространства, окружающего однородно намагниченное тело.

Сформулированное таким образом выражение магнитного потенциала носит название теоремы, основы которой около полутора столетий назад заложил Пуассон.

На основе теоремы об однородно намагниченном теле расчет магнитного потенциала намного упрощается, так как он сводится к рас-

чету потенциала гравитационного, который хорошо изучен в соответствующих разделах механики.

Значение этой теоремы для науки о магнетизме огромно. В теории девиации магнитного компаса она является фундаментальной теоремой, опираясь на которую можно вывести основные уравнения теории девиации.

Скалярное произведение (20) иногда бывает удобнее представить в другом виде. Выразим оба вектора через их составляющие по координатным осям x , y , z :

$$\begin{aligned}\bar{J} &= J_x \bar{i} + J_y \bar{j} + J_z \bar{k}; \\ \frac{d\bar{V}}{d\bar{r}} &= \frac{\partial V}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \bar{k},\end{aligned}$$

а затем перемножим их с соблюдением правил скалярного произведения:

$$U = - \left(J_x \frac{\partial V}{\partial x} + J_y \frac{\partial V}{\partial y} + J_z \frac{\partial V}{\partial z} \right). \quad (21)$$

Выражением (21) в дальнейшем воспользуемся для вывода основных уравнений теории девиации магнитного компаса.

§ 5. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

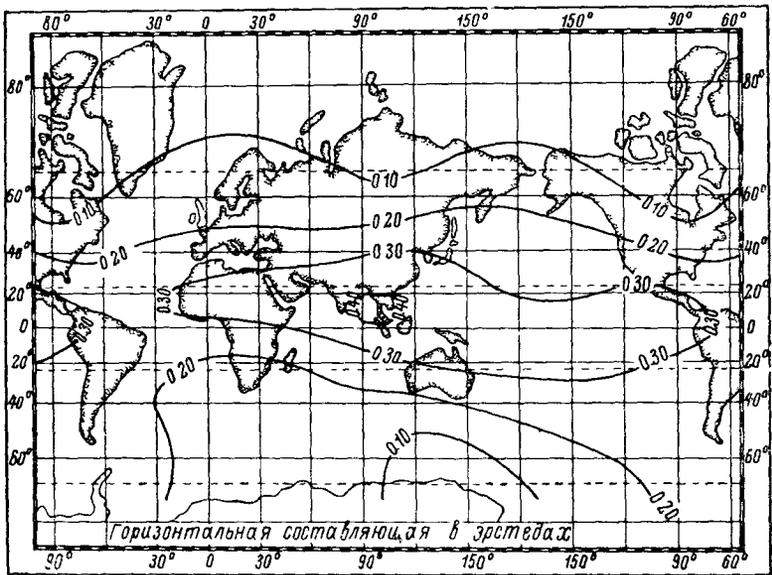
В пространстве, окружающем земной шар, на поверхности Земли, в ее недрах и под водой наблюдается магнитное поле, которое получило название магнитного поля Земли. Наукой установлено, что имеется несколько источников земного магнитного поля. С одной стороны, это поле обусловлено процессами, протекающими в самой Земле, в ее недрах, а с другой стороны, оно вызвано причинами космического происхождения и тесным образом связано с деятельностью Солнца.

Одной из главных задач науки о земном магнетизме является установление причин его происхождения и выявление внутренних взаимосвязей между этими причинами.

Способы обнаружения магнитного поля Земли могут быть самыми разнообразными. Один из простейших — это наблюдение за поведением магнитной стрелки. Если стрелку подвесить так, чтобы она могла свободно вращаться как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, то в каждой точке земной поверхности она под воздействием магнитных сил стремится принять вполне определенное положение в пространстве. Этим обнаруживается существование магнитного поля Земли.

Важно отметить, что магнитная стрелка совершает только вращательные движения и не испытывает никаких сколько-нибудь заметных поступательных движений относительно земной поверхности. А это по законам статики возможно, когда на стрелку действует пара сил, т. е. две равные параллельные, противоположно направленные силы. Следовательно, магнитное поле Земли, которое в масштабах нашей

а)



б)

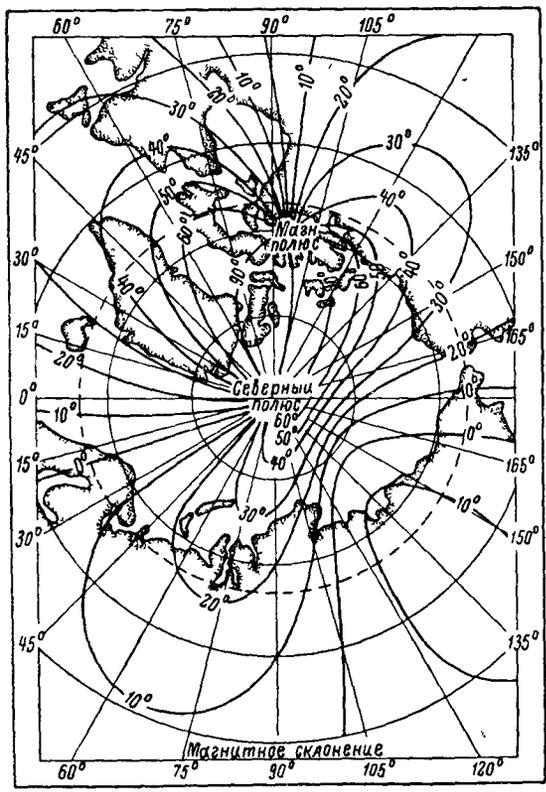


Рис 5

Исходными данными для составления карт элементов земного магнетизма являются результаты магнитных наблюдений, производимых в различных местах земной поверхности как на суше, так и на воде.

Большую роль в уточнении карт земного магнетизма и вообще в познании магнитного поля Земли сыграли результаты Международного геофизического года (1957/58), в программе которого магнитные наблюдения занимали одно из ведущих мест.

Следует особо упомянуть об очень важных результатах магнитных наблюдений, полученных с советских космических кораблей и искусственных спутников Земли, и о плавании советского немагнитного судна «Заря», на котором производится магнитная съемка Мирового океана.

Измерения, произведенные в разное время в различных частях земного шара, показывают, что магнитное поле Земли является слабым полем. Его напряженность в среднем равна 0,5 э.

Величина горизонтальной составляющей, которой определяется работа магнитного компаса, изменяется в различных местах земного шара от нуля на магнитных полюсах до 0,4 э у южной оконечности Азии. Как видно из рис. 5, а, уменьшение этой составляющей происходит в направлении от экватора к полюсам. В приполярных областях северного и южного полушарий имеются обширные районы, в которых величина H становится настолько незначительной, что магнитный компас в этих районах перестает действовать и, следовательно, не может быть использован на судне как курсоуказатель.

Величина вертикальной составляющей напряженности магнитного поля Земли изменяется от нуля на магнитном экваторе до 0,7 э в полярных районах.

Изменение магнитного склонения происходит от -180 до $+180^\circ$, причем меняется оно более или менее равномерно. Но есть на земном шаре четыре точки, в которых это изменение происходит скачкообразно (от -180 до $+180^\circ$). В этих точках, как в полюсах, сходятся изогоны. Две из них приходится на географические полюсы — Северный и Южный, а две другие отстоят на некотором удалении от географических полюсов. Ближайшая к Северному географическому полюсу (рис. 5, б) называется *северным магнитным полюсом* (приблизительно его координаты $\varphi = 72^\circ \text{N}$, $\lambda = 96^\circ \text{W}$), ближайшая к Южному географическому полюсу — *южным магнитным полюсом* (его координаты $\varphi = 70^\circ \text{S}$, $\lambda = 150^\circ \text{E}$).

Магнитное наклонение меняется от -90 до $+90^\circ$, переходя через нуль в экваториальной зоне. Нулевая изоклина плавной кривой опоясывает весь земной шар в долготном направлении. Она получила название *магнитного экватора*. Крайние значения $+90$ и -90° наклонение принимает соответственно на северном и южном магнитных полюсах.

Промежуточное положение точки на земном шаре от магнитного экватора до магнитных полюсов связано с понятием *магнитной широты* местонахождения точки. Например, если точка близка к магнит-

ным полюсам, то говорят, что она находится в больших магнитных широтах.

Кроме магнитных полюсов, которые могут быть обнаружены путем непосредственных измерений на местности, существует понятие *геомагнитных* полюсов, которые можно определить только на основании расчетов, если из всей совокупности магнитных полей, определяющих общее магнитное поле Земли, выделить ту часть, которая относится к однородному намагничиванию земного шара. Другими словами, рассматривая Землю как однородно намагниченное тело, можно рассчитать географические координаты концов магнитной оси этого тела, т. е. геомагнитных полюсов.

На одном из этих полюсов, а именно на Южном, в Антарктике, основана советская геофизическая обсерватория «Восток».

Глава II

ТЕОРИЯ ДЕВИАЦИИ

§ 6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СУДНА. УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА

Корпус транспортного судна современной постройки, машина, судовые механизмы и т. п. изготовлены из специальных сталей и других материалов, которые обладают некоторой остаточной намагниченностью, приобретенной ими как в процессе изготовления отдельных деталей, так и во время постройки всего судна в целом.

Помимо приобретенной во время постройки остаточной постоянной намагниченности, корпус судна и его механизмы не потеряли способности намагничиваться (или размагничиваться) в магнитном поле Земли, которое постоянно воздействует на судно.

Таким образом, судовое железо обладает, с одной стороны, качествами жесткого в магнитном отношении железа, а с другой — качествами мягкого железа.

Понятно, что как постоянный судовой магнетизм жесткого в магнитном отношении судового железа, так и временная намагниченность мягкого железа, возникшая под воздействием земного магнитного поля, будут оказывать влияние на любой помещенный на судне магнитный прибор. В этом случае принято говорить, что в пространстве, окружающем судно (и внутри судна), действует судовое магнитное поле.

Задача заключается в том, чтобы найти выражение напряженности этого поля, связав его с судовыми железными массами и внешними намагничивающими судно силами. Но для этого нужно знать характер намагничивания судна, т. е. закон, по которому распределя-

ется вектор намагниченности внутри стального корпуса судна, машин и механизмов.

Судно со всем его оборудованием является телом весьма сложной формы, поэтому трудно рассчитывать на то, что оно намагничивается однородно. Однако намагничивание судна при постройке и в последующие периоды его плавания происходит в слабом однородном магнитном поле Земли, к тому же магнитная восприимчивость судна, как единого целого, невелика. Вследствие этого неоднородность его намагничивания оказывается настолько незначительной, что ею практически можно пренебречь и исходить из среднего значения намагниченности для всего судна в целом.

Тогда для решения поставленной задачи можно воспользоваться теоремой Пуассона об однородном намагничивании тел, рассматривая судно как тело, намагниченность которого равна некоторой средней величине, постоянной во всех его точках.

Это решение приближенно в той степени, в какой теорема Пуассона оказывается применимой для расчета магнитного поля судна. Но опыт показывает, что практические результаты вполне удовлетворяют нуждам судовождения.

Для решения воспользуемся судовыми осями координат (см. рис. 4). Напомним, что ось x лежит в диаметральной плоскости судна и за ее положительное направление принято направление в нос; ось y перпендикулярна оси x , за ее положительное направление принято направление в правый борт; за положительное направление оси z принято направление вниз, к килю. Все три оси пересекаются в точке O , которая находится в диаметральной плоскости судна на некоторой высоте от главной палубы.

Напишем выражение магнитного потенциала судна в точке O как однородно намагниченного тела, используя для этого формулу (21):

$$U = - \left(J_x \frac{\partial V}{\partial x} + J_y \frac{\partial V}{\partial y} + J_z \frac{\partial V}{\partial z} \right). \quad (23)$$

Здесь J_x , J_y , J_z — составляющие намагниченности судна по судовым осям x , y , z ;

$\frac{\partial V}{\partial x}$, $\frac{\partial V}{\partial y}$, $\frac{\partial V}{\partial z}$ — производные по этим осям величины V , пропорциональные потенциалу притяжения, вызванного массой судна.

Для того чтобы перейти от потенциала к проекциям напряженности магнитного поля судна по осям x , y , z , нужно в соответствии с формулами (6) продифференцировать выражение потенциала (23) по координатам x , y , z и у производных изменить знаки на обратные.

Проделаем это над выражением (23), помня, что J — величина постоянная и поэтому в дифференцировании не участвует. Тогда получим проекции в точке O напряженности магнитного поля судна на три его координатные оси:

$$X_0 = - \frac{\partial U}{\partial x} = J_x \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + J_y \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} + J_z \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z};$$

$$Y_0 = -\frac{\partial U}{\partial y} = J_x \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} + J_y \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + J_z \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z};$$

$$Z_0 = -\frac{\partial U}{\partial z} = J_x \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z} + J_y \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} + J_z \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}.$$

Вектор намагниченности ферромагнитного тела выражается формулой (17). Разложим его на составляющие по судовым осям:

$$J_x = \kappa'_x X + J_{rx}; \quad J_y = \kappa'_y Y + J_{ry}; \quad J_z = \kappa'_z Z + J_{rz},$$

где X, Y, Z — проекции на эти оси напряженности намагничивающего поля — магнитного поля Земли.

Подставим значения J_x, J_y, J_z в предыдущие три уравнения. Тогда получим:

$$X_0 = (\kappa'_x X + J_{rx}) \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + (\kappa'_y Y + J_{ry}) \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} + (\kappa'_z Z + J_{rz}) \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z};$$

$$Y_0 = (\kappa'_x X + J_{rx}) \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} + (\kappa'_y Y + J_{ry}) \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + (\kappa'_z Z + J_{rz}) \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z};$$

$$Z_0 = (\kappa'_x X + J_{rx}) \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z} + (\kappa'_y Y + J_{ry}) \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} + (\kappa'_z Z + J_{rz}) \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}.$$

Раскроем скобки в каждом из этих уравнений и введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \kappa'_x \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} &= a; \quad \kappa'_y \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} = b; \quad \kappa'_z \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z} = c \\ \kappa'_x \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} &= d; \quad \kappa'_y \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = e; \quad \kappa'_z \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} = f \\ \kappa'_x \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z} &= g; \quad \kappa'_y \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} = h; \quad \kappa'_z \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = k \\ P &= J_{rx} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + J_{ry} \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} + J_{rz} \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z} \\ Q &= J_{rx} \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} + J_{ry} \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + J_{rz} \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} \\ R &= J_{rx} \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z} + J_{ry} \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} + J_{rz} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Учитывая принятые обозначения, систему уравнений можно написать так:

$$X_0 = aX + bY + cZ + P;$$

$$Y_0 = dX + eY + fZ + Q;$$

$$Z_0 = gX + hY + kZ + R.$$

Как уже было сказано, эти уравнения выражают собой проекции напряженности магнитного поля судна в точке O (см. рис. 4). Но если предположить, что в этой точке находится магнитный прибор, в част-

ности магнитный компас, то он регистрирует не только воздействие судового магнетизма, но также непосредственное действие на него магнитного поля Земли.

Чтобы выразить совместное действие судового магнитного поля и поля Земли, нужно алгебраически сложить проекции напряженностей этих полей на соответствующие судовые оси:

$$X' = X + X_0; \quad Y' = Y + Y_0; \quad Z' = Z + Z_0,$$

где X' , Y' , Z' — проекции напряженности на судовые оси x , y , z суммарного магнитного поля;

X , Y , Z — проекции напряженности на те же оси магнитного поля Земли;

X_0 , Y_0 , Z_0 — проекции напряженности магнитного поля судна. Отсюда

$$\left. \begin{aligned} X' &= X + aX + bY + cZ + P \\ Y' &= Y + dX + eY + fZ + Q \\ Z' &= Z + gX + hY + kZ + R \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Выражения (25) получили название уравнений Пуассона, так как впервые они были выведены им на основании теоремы об однородном намагничивании тел.

Входящие в эти уравнения величины a , b , c ... k называются *параметрами* Пуассона. Они характеризуют собой мягкое в магнитном отношении железо: его магнитные качества κ , форму и размеры, а также расположение относительно начала координат O , точнее относительно центра компаса, который в дальнейшем будем предполагать находящимся в точке O .

Слагаемые P , Q , R выражают проекции напряженности на судовые оси магнитного поля постоянного судового магнетизма, обусловленного наличием в конструкции судна жесткого в магнитном отношении материала.

Все эти величины (параметры и проекции P , Q и R) для данного компаса и при данном магнитном состоянии судна остаются практически постоянными до тех пор, пока на судне не произойдет перемещения железных масс относительно компаса, или перестановки самого компаса на другое место (переноса начала координат O). Очевидно, что для магнитных компасов, расположенных в разных местах судна, эти величины будут различны.

Изменения курса судна не влияют на постоянство этих величин. Изменение магнитной широты района плавания не сказывается на величинах P , Q и R , но приводит к незначительным изменениям параметров. Эти изменения вызваны тем, что магнитная восприимчивость ферромагнитных тел, входящая в выражения этих параметров, меняется в зависимости от изменения напряженности намагничивающего поля (изменения магнитной широты).

Опыты подтверждают изменения параметров Пуассона с магнитной широтой, однако в дальнейшем изложении эти изменения из-за их малости учитываться не будут.

Встряски судна — удары о лед, штормовую волну, а также внутренние напряжения в корпусе, вызванные загрузкой судна, — отражаются на его магнитном состоянии. Кроме того, на магнитное состояние судна влияют сильные магнитные поля, вызванные мощными электроустановками на судне и вне его.

Чтобы лучше усвоить физическую сущность параметров Пуассона, рассчитаем в качестве примера параметр a для шара, обладающего магнитной восприимчивостью κ' . Шар выбран как тело простейшей формы.

Пусть радиус шара равен R и центр его находится на расстоянии r от центра компаса. На основании формул (24)

$$a = \kappa' \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}.$$

Потенциал сил притяжения шара

$$V = \frac{4}{3} \pi \frac{R^3}{r},$$

где плотность вещества, заполняющего шар, принята за единицу.

Образует вторую частную производную от потенциала притяжения шара по переменной x , приняв во внимание, что $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{r^2 - 3x^2}{r^5} \frac{4}{3} \pi R^3. \quad (26)$$

Магнитная восприимчивость шара

$$\kappa' = \frac{\kappa}{1 + \frac{4}{3} \pi \kappa},$$

где κ — магнитная восприимчивость материала.

Умножим выражение κ' на значение второй производной в формуле (26), тогда получим искомый параметр

$$a = -k R^3 \frac{r^2 - 3x^2}{r^5},$$

где

$$k = \frac{\frac{4}{3} \pi \kappa}{1 + \frac{4}{3} \pi \kappa}.$$

Если шар установлен в плоскости шпангоута, проходящего через центр компаса ($x = 0$), то

$$a = -k \frac{R^3}{r^3}.$$

Если шар установлен в диаметральной плоскости компаса и центр его находится на уровне картушки ($x = r$), то

$$a = 2k \frac{R^3}{r^3}.$$

Из этих расчетов, в частности, видно, что перемещение шара из плоскости шпангоута в диаметральную плоскость вызывает как изменение знака параметра, так и его величины.

§ 7. АНАЛИЗ УРАВНЕНИЙ ПУАССОНА

Чтобы ясно представить себе, как возникает и действует на судне каждая из составляющих, вошедшая в уравнения Пуассона, произведем подробный анализ этих уравнений.

Напишем уравнения Пуассона:

$$X' = X + aX + bY + cZ + P,$$

$$Y' = Y + dX + eY + fZ + Q,$$

$$Z' = Z + gX + hY + kZ + R.$$

Как уже было сказано в предыдущем параграфе, первое и последнее слагаемые каждого из трех уравнений представляют собой проекции на соответствующие судовые оси напряженности земного магнитного поля и постоянного судового магнетизма; остальные девять проекций выражают действие мягкого в магнитном отношении судового железа, способного намагничиваться в магнитном поле Земли.

Рассмотрим подробно именно эти девять составляющих. Заметим, что в каждой из них отражены два процесса: с одной стороны, процесс намагничивания тела, а с другой — воздействие этого намагниченного тела на окружающие его тела. Например, весь второй столбец правой части уравнений указывает на то, что судно в целом или отдельные его части обладают способностью намагничиваться продольной составляющей X напряженности магнитного поля Земли. Но намагнитившись этой составляющей, каждая из частей судового набора действует в точке O (см. рис. 4) по-разному.

Слагаемое aX , вошедшее в первое уравнение, показывает, что это действие направлено по продольной судовой оси Ox . Слагаемое dX , которое вошло во второе уравнение, указывает на действие по поперечной оси Oy , и третье слагаемое gX характеризует действие в вертикальном направлении Oz .

Весь третий столбец правой части уравнений Пуассона характеризует намагничивание судна поперечной составляющей Y напряженности магнитного поля Земли. Но три компонента bY , eY и hY , объединенные в этом столбце, указывают, что хотя тела и намагничены одной составляющей Y , однако действие этого намагничивания в точке O проявляется в трех различных направлениях. Весь четвертый столбец правой части уравнений относится к намагничиванию судна в вертикальном направлении.

Поясним все сказанное на рис. 6. Плоскость рисунка совместим с диаметральной плоскостью судна.

Положим, что судно намагничено исключительно продольной составляющей X магнитного поля Земли, причем магнитный курс судна располагается так, что эта составляющая действует в нос и, следовательно, северный магнитный полюс судна (магнита) находится в носовой части, а южный — в кормовой. Напомним, что рассматривается случай однородного намагничивания. Это значит, что магнитная ось судна лежит в плоскости его симметрии, т. е. в диаметральной плоскости. Пунктиром на чертеже показана магнитная силовая линия собственного магнитного поля судна.

Касательная в каждой точке пунктирной кривой указывает направление напряженности этого поля в данной точке.

Способностью намагничиваться в продольном направлении обладают многие части судна: киль, стрингеры, борта и т. д. Поэтому продольное намагничивание судна достаточно интенсивно.

Рассмотрим действие судового магнетизма в точке O (см. рис. 6), в которой касательная к магнитной силовой линии совпадает с осью Ox . Следовательно, имеем случай, когда судно намагничено по продольной оси и действие судового магнетизма

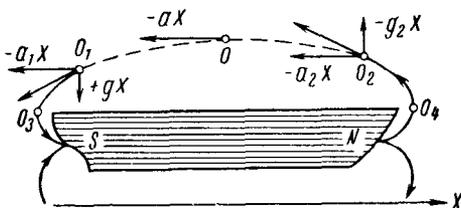


Рис 6

в точке O проявляется также в продольном направлении. В соответствии с уравнениями Пуассона это действие выражается составляющей aX .

Заметим, что проекция X положительна — она направлена в нос, а составляющая aX отрицательна — она действует в корму. Это возможно в единственном случае, когда $a < 0$. Значит, в точке O параметр a отрицателен.

Переместившись в точку O_1 или O_2 , видим, что касательные к силовым линиям в этих точках можно разложить на продольные и вертикальные составляющие. О продольных составляющих только что было сказано, они обозначаются aX (где $a < 0$), вертикальные же составляющие при продольном намагничивании судна выражены в уравнениях Пуассона величиной gX . Причем в точке O_1 вертикальная составляющая положительна (она направлена вниз), а так как $X > 0$, то и параметр g_1 в этой точке имеет знак плюс. В точке O_2 параметр g_2 отрицательный, так как при положительном направлении намагничивающего поля X составляющая g_2X направлена вверх.

Поскольку векторы напряженности магнитного поля судна, изображенные на рисунке в виде касательных к магнитной силовой линии, лежат в диаметральной плоскости судна (в плоскости рисунка), то проекции этих векторов на поперечное направление равны нулю, т. е. равен нулю параметр d в уравнениях Пуассона.

Таким образом, рассмотрев случай однородного продольного намагничивания, можно сказать, что для точек, находящихся в диаметральной плоскости судна, мягкое в магнитном отношении судовое железо характеризуется двумя параметрами: отрицательным параметром a и положительным или отрицательным параметром g .

Параметр d в диаметральной плоскости равен нулю.

При рассмотрении рис. 6 нельзя не отметить, что в средней части кривой на большом протяжении вправо и влево от точки O параметр g мал и в самой точке O обращается в нуль. Параметр a нигде на кривой не равен нулю, если не считать точек O_3 и O_4 , находящихся за пределами судна.

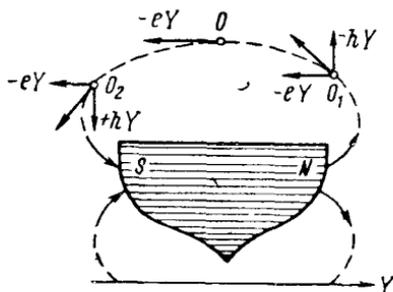


Рис. 7

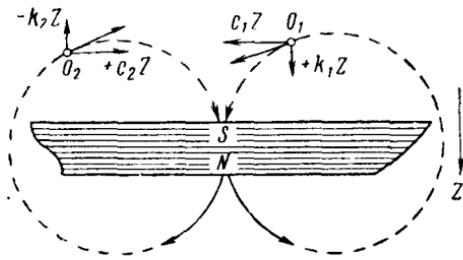


Рис. 8

Перейдем к рассмотрению поперечного намагничивания судна, которое происходит под воздействием поперечной составляющей магнитного поля Земли. Такое намагничивание также достаточно интенсивно, так как в наборе судна имеются части, расположенные в поперечном направлении: бимсы, переборки, флортимберсы и т. д.

Представим этот случай при помощи рис. 7, плоскость которого совместим с плоскостью шпангоута.

Будем считать, что судно лежит на таком магнитном курсе, когда составляющая Y действует в правый борт. Следовательно, северный магнитный полюс судна будет располагаться по правому борту, а южный — по левому.

В точке O , находящейся в диаметральной плоскости судна, касательная к магнитной силовой линии совпадает с осью Oy — она горизонтальна и лежит в плоскости шпангоута. Но эта касательная есть одна из составляющих вектора напряженности магнитного поля судна в данной точке.

Судно намагнитилось по поперечной оси oy , и действие судового магнетизма в точке O проявляется также в поперечном направлении. Это действие в уравнениях Пуассона выражается составляющей eY .

Намагничивающее поле Y направлено в правый борт — оно положительно, а составляющая eY действует в обратном направлении — она отрицательна. Это значит, что параметр e в точке O является величиной отрицательной.

переместившись в точку O_1 или O_2 , замечаем, что касательные к магнитной силовой линии в этих точках могут быть разложены каждая на две составляющие: поперечную и вертикальную. Поперечные составляющие выражаются величинами eY , вертикальные же составляющие, возникшие от поперечного намагничивания судна, находятся в последней строке третьего столбца уравнений Пуассона. Эти составляющие равны $\pm hY$.

Третья, продольная проекция судового магнитного поля bY , возникающая от поперечного намагничивания судна, равна нулю, так как вектор напряженности поля лежит в плоскости шпангоута и проекции на продольную ось судна не имеет.

В результате рассмотрения поперечного намагничивания судна можно сказать, что в точках, находящихся в диаметральной плоскости, как показано на рис. 7, мягкое в магнитном отношении судовое железо характеризуется отрицательным параметром e . Параметры b и h в этих точках равны нулю.

Переходя к рассмотрению вертикального намагничивания судна, напомним, что вертикальная составляющая земного магнитного поля Z в северном полушарии направлена вниз. Поэтому у судна, намагниченного вертикальной составляющей северного полушария, северный магнитный полюс будет располагаться в нижней части, у киля, а южный — наверху. Это показано на рис. 8, где дан разрез по диаметральной плоскости судна. Такое намагничивание судна вполне возможно, так как в его наборе имеется много вертикально расположенных частей: пиллерсы, мачты и сами борта с надстройками.

Векторы напряженности судового магнитного поля представлены на рисунке в виде касательных к магнитным силовым линиям в точках O_1 и O_2 . Эти векторы лежат в диаметральной плоскости судна, поэтому они могут быть разложены каждый на две составляющие: продольную и вертикальную. Поперечных составляющих они не имеют.

В данном случае рассматривается вертикальное намагничивание судна. Горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля судна при вертикальном его намагничивании выражается в уравнениях Пуассона величиной cZ ; другая составляющая, которая действует вертикально вверх или вниз, при таком же характере намагничивания судна равна kZ . Поперечная составляющая в этих уравнениях, равная fZ , в диаметральной плоскости обращается в нуль.

Таким образом, для точек, находящихся в диаметральной плоскости судна, как показано на рис. 8, мягкое в магнитном отношении судовое железо характеризуется параметрами $\pm k$ и $\pm c$. Параметр f в этих точках равен нулю.

При анализе уравнений Пуассона во всех трех случаях намагничивания судна — продольном, поперечном и вертикальном — были рассмотрены такие точки, в которых обычно устанавливается главный магнитный компас.

Установка главного компаса производится на верхнем мостике, т. е. на достаточно большом возвышении от главной палубы, и в диаметральной плоскости судна. Поэтому в результате анализа урав-

нений приходим к заключению, что на главный магнитный компас (как, впрочем, и на любой другой магнитный прибор, установленный на его месте) действует магнитное поле, напряженность которого выражается следующими тремя уравнениями:

$$X' = X + aX + 0 + cZ + P;$$

$$Y' = Y + 0 + eY + 0 + Q;$$

$$Z' = Z + gX + 0 + kZ + R.$$

В этих уравнениях четыре параметра обратились в нуль. Однако опыт показывает, что на судне в районе главного магнитного компаса полной симметрии в магнитном отношении нет. Поэтому указанные параметры вблизи главного компаса хоть и незначительны и очень часто во внимание не принимаются, но не равны нулю. У путевых компасов, устанавливаемых в рулевых рубках вне диаметральной плоскости судна, эти параметры велики и пренебрегать ими нельзя.

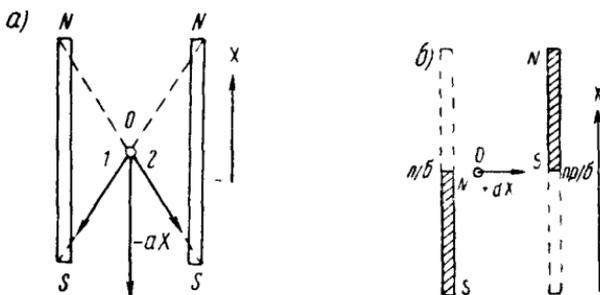


Рис 9

Если изучать магнитное поле судна не в верхней его части, а под дном, то уравнения Пуассона и выводы, полученные на основе их анализа, остаются справедливыми; меняются только знаки некоторых параметров.

Иногда бывает необходимо определить параметр (его буквенное обозначение и знак), которым характеризуются отдельные железные бруски, расположенные неподалеку от компаса.

В качестве примера рассмотрим два одинаковых продольных параллельных бруска, установленных по бокам компаса (рис. 9, а).

Намагнитившись продольной составляющей земного магнитного поля X , эти бруски создадут свое собственное магнитное поле, вектор напряженности которого в точке O , в центре компаса, может быть построен следующим образом: северные полюсы обоих брусков будут отталкивать единицу количества магнетизма северного наименования, которая предполагается в точке O , а южные — притягивать. Это показано на чертеже отрезками 1 и 2, построенными в произвольном масштабе. Геометрическая сумма этих отрезков указывает направление вектора напряженности магнитного поля обоих брусков. Из рисунка видно, что бруски намагничиваются продольной составляющей X и действуют в точке O в продольном же направлении, но только

навстречу полю. На основании уравнений Пуассона это действие выражается составляющей — aX . Следовательно, продольные железные бруски, установленные по бокам компаса, характеризуются отрицательным параметром a .

Если оба бруска повернуть в горизонтальной плоскости на угол 90° вокруг точки O , то они будут намагничиваться поперечной составляющей магнитного поля Земли Y . Намагнитившись, оба бруска будут действовать в точке O в поперечном направлении, т. е. будут характеризоваться параметром e , который в данном случае в точности равен параметру a , и по величине и по знаку.

Другой пример. Пусть те же бруски установлены асимметрично относительно точки O , как показано на рис. 9, б. Намагнитившись продольной составляющей X , оба бруска своими ближайшими полюсами воздействуют на единицу количества магнетизма северного наименования в точке O : северный полюс отталкивает ее, а южный притягивает.

Бруски намагничены продольной составляющей X , а воздействуют на единицу количества магнетизма в поперечном направлении. Это действие в уравнениях Пуассона выражается через dX .

Намагничивающая сила X направлена в сторону носа, поэтому по правилу знаков она положительна. Воздействие брусков dX направлено к правому борту, и это значит, что оно также имеет положительный знак. Следовательно, параметр d в данном случае имеет знак плюс.

Если левый брусок продвинуть вперед, а правый — назад, как показано на рисунке пунктирными линиями, то воздействующая сила этих брусков dX будет направлена к левому борту, а так как направление силы X осталось неизменным, то изменится знак параметра d — он станет отрицательным.

Если оба бруска повернуть по горизонту вокруг точки O на 90° , то они будут способны намагничиваться поперечной составляющей Y и, намагнитившись, будут действовать в точке O в продольном направлении, т. е. будут характеризоваться параметром b .

Подобные же действия во всех рассмотренных выше случаях будут проявлять два неодинаковых по размерам бруска или один брусок.

При анализе уравнений Пуассона был рассмотрен магнетизм мягкого в магнитном отношении судового железа. Все это можно отнести и к магнитно-жесткому железу; разница лишь в том, что магнитно-жесткое железо обладает остаточной намагниченностью, не зависящей от курса судна и от магнитной широты района плавания. Поэтому при построении рисунка для продольного, поперечного и вертикального намагничивания судна (см. рис. 6, 7 и 8) отпадает необходимость учитывать, на каких курсах должно лежать судно и в каких магнитных широтах плавать, чтобы оно было намагничено по заданному направлению.

Действие магнетизма жесткого в магнитном отношении железа в уравнениях Пуассона также определяется девятью составляющими. Но, учитывая постоянство этих составляющих (независимость от кур-

са и магнитной широты), их объединяют в три группы, представленные последними тремя равенствами (24), и каждую группу обозначают постоянной величиной P , Q и R , которая входит в соответствующее уравнение.

Иногда для решения специальных вопросов бывает удобнее не вводить этих обозначений, и тогда вместо одной из величин P , Q или R в каждое уравнение вписывают по три слагаемых; так что каждое из уравнений, выражающих проекции напряженности магнитного поля судна, оказывается состоящим из шести слагаемых: три слагаемых представляют действия мягкого в магнитном отношении железа и три жесткого.

При рассмотрении действия мягкого в магнитном отношении железа подобную замену трех составляющих одной величиной производить нельзя. Чтобы убедиться в этом, напомним уравнения Пуассона (25) для следующих двух случаев.

1. Магнитный курс судна — N . Район плавания характеризуется горизонтальной составляющей земного магнитного поля H и вертикальной Z .

Напомним, что соотношения между горизонтальной составляющей магнитного поля Земли H и ее проекциями на судовые оси x и y определяются формулами (22).

В нашем случае магнитный курс $k = 0$. Следовательно, на основании этих формул

$$X = H; Y = 0.$$

Поэтому искомые уравнения после произведенной в них замены будут иметь вид:

$$\begin{aligned} X' &= H + aH + cZ + P; \\ Y' &= dH + fZ + Q; \\ Z' &= Z + gH + kZ + R. \end{aligned}$$

2. Судно оказалось в районе магнитного экватора ($Z = 0$) и следует магнитным курсом E ($k = 90^\circ$).

На основании известных соотношений

$$X = 0, \quad Y = -H$$

уравнения Пуассона примут вид:

$$\begin{aligned} X' &= -bH + P; \\ Y' &= -H - eH + Q; \\ Z' &= -hH + R. \end{aligned}$$

Из этих примеров ясно, как меняются в зависимости от изменения курса и магнитной широты составляющие переменного намагничивания, приобретенного мягким в магнитном отношении судовым железом, и как проявляет себя жесткое железо, магнетизм которого остается неизменным.

Говоря о зависимости судового магнетизма от магнитного курса судна, нужно отметить, что эта зависимость представляет собой пе-

риодическую функцию периода 2π . В этом нетрудно убедиться, подставляя в уравнения Пуассона различные значения магнитного курса от 0 до 360° , подобно тому, как это было сделано для двух курсов в рассмотренных выше примерах.

§ 8. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ ПУАССОНА

В предыдущих параграфах было установлено, что уравнения Пуассона (25) выражают собой проекции напряженности магнитного поля Земли и поля судна на три взаимно перпендикулярные судовые оси. Если эти проекции геометрически сложить, то тем самым определится в пространстве вектор суммарной напряженности обоих полей T' (рис. 10). Этот вектор в общем случае не будет совпадать с направлением магнитного поля Земли в точке O .

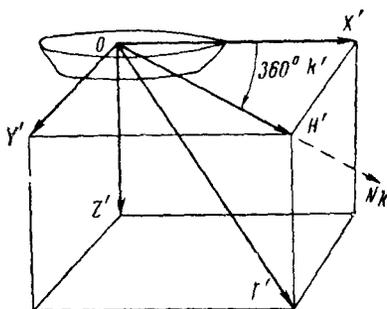


Рис 10

Вертикальная плоскость, в которой располагается этот вектор, называется *плоскостью компасного меридиана*.

Горизонтальный угол, который образует эта плоскость с плоскостью магнитного меридиана, называется *девиацией* и обозначается δ .

Обозначим проекцию вектора T' на горизонтальную плоскость буквой H' ; тогда из рис. 10 установим, что

$$X' = H' \cos k'; \quad Y' = -H' \sin k', \quad (27)$$

где k' — компасный курс судна.

Магнитный компас устроен так, что его стрелками в горизонтальной плоскости управляет не полный вектор напряженности внешнего магнитного поля, а только его горизонтальная проекция. Если компас действует в магнитном поле Земли, вдали от скопления железных масс, то эта проекция равна H — горизонтальной составляющей земного магнитного поля. Она лежит в плоскости магнитного меридиана, поэтому картушка компаса своей магнитной осью располагается в этой плоскости.

Если же компас находится на судне, в точке O (см. рис. 10), то на него действует не только магнитное поле Земли, но и поле судна. Следовательно, компасными стрелками в данном случае управляет горизонтальная составляющая H' суммарного поля. Эта составляющая так же, как и вектор T' , лежит в плоскости компасного меридиана, поэтому картушка компаса на судне своей магнитной осью располагается по компасному меридиану, образуя с магнитным меридианом угол отклонения — девиацию.

Чтобы установить связь между девиацией и порождающим ее судовым магнитным полем, нужно преобразовать уравнения Пуассона

так, чтобы в одной части уравнений была девиация, а в другой — элементы, характеризующие это поле. Но поскольку судовое магнитное поле является периодической функцией курса судна, то в ходе преобразования будем стремиться представить эту периодическую функцию в виде тригонометрического полинома, т. е. конечного ряда, расположенного по синусам и косинусам курса, возрастающего в арифметической прогрессии.

Подобное представление периодической функции в виде суммы простейших гармоник обладает большим удобством, так как позволяет упростить изучение сложных периодических явлений. Так поступают, например, в теории приливов, где явление прилива представляется в виде тригонометрического ряда, куда входят отдельные составляющие волны, обусловленные различными астрономическими причинами.

Приступая к преобразованию, заметим, что зависимость между девиацией и порождающим ее судовым магнетизмом заложена в уравнениях Пуассона. Однако сами уравнения в том виде, как они были получены, не выражают в явном виде девиации.

В левых частях первых двух уравнений представлены проекции на координатные оси Ox и Oy горизонтальной составляющей суммарного магнитного поля H' , которая управляет компасными стрелками в горизонтальной плоскости и определяет величину в знак девиации. Поэтому эти два уравнения должны быть подвергнуты преобразованию. Третье уравнение в прямом положении судна (без крена и дифферента) выражает вертикальную составляющую, которая девиации не производит, и поэтому в преобразовании участвовать не должно.

Если судно наклонится на тот или другой борт или получит дифферент, то вертикальная составляющая даст проекцию на горизонтальную плоскость и тем самым усилит или ослабит горизонтальные силы, т. е. окажет влияние на величину и знак девиации.

Рассмотрим явление девиации на судне, находящемся в прямом положении. Для этого в первых двух уравнениях Пуассона произведем замену, выразив входящие в них величины X , Y и X' , Y' в соответствии с формулами (22) и (27), а затем разделим обе части уравнений на H :

$$\begin{aligned} \frac{H'}{H} \cos k' &= (1 + a) \cos k - b \sin k + \frac{cZ + P}{H}; \\ -\frac{H'}{H} \sin k' &= d \cos k - (1 + e) \sin k + \frac{fZ + Q}{H}. \end{aligned} \quad (28)$$

Девиация, как угол между магнитным и компасным меридианами, может быть представлена в виде разности магнитного и компасного курсов:

$$\delta = k - k'.$$

Поэтому, если правую и левую части первого уравнения (28) умножим на $\cos k$, а второго на $\sin k$ и из первого уравнения вычтем по-

членно второе, то в левой части полученного выражения вместо косинуса компасного курса будем иметь косинус разности курсов магнитного и компасного, т. е. косинус девиации:

$$\frac{H'}{H} \cos \delta = (1+a) \cos^2 k - b \sin k \cos k + \frac{cZ+P}{H} \cos k - d \sin k \cos k + \\ + (1+e) \sin^2 k - \frac{fZ+Q}{H} \sin k.$$

Умножим обе части первого уравнения (28) на $\sin k$, а второго на $\cos k$ и сложим оба уравнения. В левой части полученного равенства вместо синуса компасного курса будем иметь синус разности магнитного и компасного курсов, т. е. синус девиации:

$$\frac{H'}{H} \sin \delta = (1+a) \sin k \cos k - b \sin^2 k + \frac{cZ+P}{H} \sin k + \\ + d \cos^2 k - (1+e) \sin k \cos k + \frac{fZ+Q}{H} \cos k.$$

Для дальнейшего преобразования воспользуемся следующими тригонометрическими формулами:

$$\sin k \cos k = \frac{1}{2} \sin 2k;$$

$$\sin^2 k = \frac{1}{2} (1 - \cos 2k);$$

$$\cos^2 k = \frac{1}{2} (1 + \cos 2k),$$

Тогда

$$\frac{H'}{H} \cos \delta = \frac{1}{2} (1+a) (1 + \cos 2k) - \frac{b}{2} \sin 2k + \frac{cZ+P}{H} \cos k - \\ - \frac{d}{2} \sin 2k + \frac{1}{2} (1+e) (1 - \cos 2k) - \frac{fZ+Q}{H} \sin k;$$

$$\frac{H'}{H} \sin \delta = \frac{1}{2} (1+a) \sin 2k - \frac{b}{2} (1 - \cos 2k) + \frac{cZ+P}{H} \sin k + \\ + \frac{d}{2} (1 + \cos 2k) - \frac{1}{2} (1+e) \sin 2k + \frac{fZ+Q}{H} \cos k.$$

Раскроем скобки и сгруппируем члены по синусам и косинусам курса:

$$\frac{H'}{H} \cos \delta = 1 + \frac{a+e}{2} + \frac{cZ+P}{H} \cos k - \frac{fZ+Q}{H} \sin k + \\ + \frac{a-e}{2} \cos 2k - \frac{d+b}{2} \sin 2k;$$

$$\frac{H'}{H} \sin \delta = \frac{d-b}{2} + \frac{cZ+P}{H} \sin k + \frac{fZ+Q}{H} \cos k + \\ + \frac{a-e}{2} \sin 2k + \frac{d+b}{2} \cos 2k.$$

Величину $1 + \frac{a+e}{2}$ обозначим буквой λ . Поставим условие, чтобы на судне у компаса величина λ всегда была больше нуля. Тогда, разделив правые и левые части полученных выражений на λ , будем иметь:

$$\begin{aligned} \frac{H'}{\lambda H} \cos \delta &= 1 + \frac{cZ+P}{\lambda H} \cos k - \frac{fZ+Q}{\lambda H} \sin k + \frac{a-e}{2\lambda} \cos 2k - \\ &\quad - \frac{d+b}{2\lambda} \sin 2k; \\ \frac{H'}{\lambda H} \sin \delta &= \frac{d-b}{2\lambda} + \frac{cZ+P}{\lambda H} \sin k + \frac{fZ+Q}{\lambda H} \cos k + \\ &\quad + \frac{a-e}{2\lambda} \sin 2k + \frac{d+b}{2\lambda} \cos 2k. \end{aligned}$$

Введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d-b}{2\lambda} &= A' \\ \frac{cZ+P}{\lambda H} &= B' \\ \frac{fZ+Q}{\lambda H} &= C' \\ \frac{a-e}{2\lambda} &= D' \\ \frac{d+b}{2\lambda} &= E' \end{aligned} \right\}. \quad (29)$$

Величины A' , B' , C' , D' и E' называются *точными коэффициентами девиации* и представляют собой отвлеченные числа. С учетом принятых обозначений (29) получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{H'}{\lambda H} \cos \delta &= 1 + B' \cos k - C' \sin k + D' \cos 2k - E' \sin 2k \\ \frac{H'}{\lambda H} \sin \delta &= A' + B' \sin k + C' \cos k + D' \sin 2k + E' \cos 2k \end{aligned} \right\}. \quad (30)$$

Если второе уравнение (30) разделим на первое, то в результате получим формулу тангенса девиации

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{A' + B' \sin k + C' \cos k + D' \sin 2k + E' \cos 2k}{1 + B' \cos k - C' \sin k + D' \cos 2k - E' \sin 2k} \quad (31)$$

или формулу Арчибальда Смита¹.

¹ Английский ученый XIX в.

Этой формулой можно было бы завершить преобразование упомянутых уравнений. Однако в дальнейших выводах представляется более удобным пользоваться формулой (31) в ином ее виде. Для этого перепишем эту формулу, перенеся знаменатель дроби в левую часть:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta (1 + B' \cos k - C' \sin k + D' \cos 2k - E' \sin 2k) = \\ = A' + B' \sin k + C' \cos k + D' \sin 2k + E' \cos 2k, \end{aligned}$$

а затем, сделав замену $\operatorname{tg} \delta = \frac{\sin \delta}{\cos \delta}$, выразим ту же формулу в таком виде:

$$\begin{aligned} \sin \delta (1 + B' \cos k - C' \sin k + D' \cos 2k - E' \sin 2k) = \\ = \cos \delta (A' + B' \sin k + C' \cos k + D' \sin 2k + E' \cos 2k). \end{aligned}$$

В правой и левой части откроем скобки и сгруппируем члены по коэффициентам девиации:

$$\begin{aligned} \sin \delta = A' \cos \delta + B' (\sin k \cos \delta - \cos k \sin \delta) + C' (\cos k \cos \delta + \\ + \sin k \sin \delta) + D' (\sin 2k \cos \delta - \cos 2k \sin \delta) + \\ + E' (\cos 2k \cos \delta + \sin 2k \sin \delta). \end{aligned}$$

Пользуясь формулами синусов и косинусов разности двух углов, заменим стоящие в скобках выражения:

$$\begin{aligned} \sin \delta = A' \cos \delta + B' \sin (k - \delta) + C' \cos (k - \delta) + D' \sin (2k - \delta) + \\ + E' \cos (2k - \delta). \end{aligned}$$

Известно, что магнитные и компасные курсы связаны равенствами:

$$k' = k - \delta; \quad 2k' + \delta = 2k - \delta.$$

Воспользуемся ими и тогда окончательно получим

$$\begin{aligned} \sin \delta = A' \cos \delta + B' \sin k' + C' \cos k' + D' \sin (2k' + \delta) + \\ + E' \cos (2k' + \delta). \end{aligned} \quad (32)$$

Эта формула не выражает девиации в явном виде (δ входит в правую и левую части), но, как было сказано, она является более удобной в решении многих вопросов теории и практики девиационных работ. Эти вопросы будут рассмотрены в дальнейшем, а сейчас вернемся к коэффициентам девиации.

Как показывают формулы (29), коэффициенты девиации не зависят от курса судна. Три коэффициента A' , D' , E' не зависят и от магнитной широты района плавания, если считать, что магнитная восприимчивость материала μ , входящая в выражения параметров Пуассона, не меняется от изменения магнитной широты. Остальные два коэффициента B' и C' изменяются при переходе судна из одного района земного шара в другой, так как в их выражения входят элементы магнит-

ного поля Земли H и Z , меняющиеся при перемещении от точки к точке по земной поверхности. Что касается других причин, влияющих на изменение коэффициентов девиации, то все, что было сказано об изменениях параметров Пуассона, остается в силе и для коэффициентов девиации.

Говоря о коэффициентах девиации, необходимо напомнить, что если рассматривается главный компас, установленный на верхнем мостике в диаметральной плоскости судна, то в этом случае некоторые параметры, в том числе параметры b и d , близки к нулю. Поэтому коэффициенты A' и E' у главного компаса малы. Остальные коэффициенты по величине могут быть самые разнообразные, но чаще всего они распределяются так: больше всех B' , затем C' и наконец D' .

В заключение необходимо сделать следующее замечание. В некоторых отечественных руководствах по девиации, в ПШС № 27 изд. 1963 г., а также в иностранных изданиях точные коэффициенты девиации обозначаются буквами готического алфавита. Для облегчения пользования этими руководствами приводим принятые там обозначения:

$$A' = \mathfrak{A}, B' = \mathfrak{B}, C' = \mathfrak{C}, D' = \mathfrak{D}, E' = \mathfrak{E}.$$

§ 9. СУДОВЫЕ МАГНИТНЫЕ СИЛЫ

Вернемся к формулам (30). Умножим правые и левые части этих формул на λH , тогда получим проекции суммарной напряженности магнитного поля судна и поля Земли на направление магнитного меридиана:

$$H' \cos \delta = \lambda H = B' \lambda H \cos k - C' \lambda H \sin k + D' \lambda H \cos 2k - E' \lambda H \sin 2k \quad (33)$$

и на направление, перпендикулярное магнитному меридиану (рис. 11):

$$H' \sin \delta = A' \lambda H + B' \lambda H \sin k + C' \lambda H \cos k + D' \lambda H \sin 2k + E' \lambda H \cos 2k. \quad (34)$$

Входящие в выражения (33) и (34) величины

$$\lambda H, A' \lambda H, B' \lambda H, C' \lambda H, D' \lambda H \text{ и } E' \lambda H$$

в руководствах по девиации называются *судовыми магнитными силами*. В отношении этих шести величин будем и мы придерживаться принятой терминологии, т. е. будем называть их силами, несмотря на то, что эти величины представляют собой не силы, а напряженности.

Напомним, что для перехода к силе взаимодействия нужно напряженность поля умножить на количество магнетизма m , которое взаимодействует с данным полем. В упомянутых шести величинах напряженность H умножается не на количество магнетизма m , а на отвлеченные числа.

Рассмотрим судовые магнитные силы.

Во-первых, отметим, что большинство из этих сил вызвано магнитными действиями мягкого в магнитном отношении судового железа. К этим силам относятся λH , $A'\lambda H$, $D'\lambda H$, $E'\lambda H$. Стоящие перед ними коэффициенты λ, A', D', E' определяются параметрами мягкого в магнитном отношении железа, как это вытекает из формулы (29).

Только две силы $B'\lambda H$ и $C'\lambda H$ вызваны магнитными действиями главным образом жесткого в магнитном отношении материала, и лишь частично в них проявляется магнетизм мягкого железа. Это легко установить, если вспомнить, что в выражения коэффициентов B' и C' входят элементы как жесткого, так и мягкого магнитного материала.

Но вернемся к первым четырем силам: λH , $A'\lambda H$, $D'\lambda H$ и $E'\lambda H$. Все они изменяются по величине в зависимости от изменения горизон-

тальной составляющей напряженности магнитного поля Земли H , которая входит множителем в каждую из названных сил.

На основании обозначений (29) имеем

$$\lambda H = \left(1 + \frac{a+e}{2}\right) H; \quad A'\lambda H = \frac{d-b}{2} H; \quad D'\lambda H = \frac{a-e}{2} H;$$

$$E'\lambda H = \frac{d+b}{2} H.$$

Изменение остальных двух сил $B'\lambda H$ и $C'\lambda H$ происходит в зависимости от вертикальной составляющей земного магнитного поля Z :

$$B'\lambda H = cZ + P; \quad C'\lambda H = fZ + Q,$$

однако наблюдающиеся у компаса непостоянства P и Q часто нарушают эту зависимость.

Важно заметить, что в соответствии с формулой (31) изменения судовых магнитных сил в зависимости от H не должны влиять на величину девиации, поскольку составляющая H не входит ни в числитель, ни в знаменатель дроби (31). Эта составляющая при выводе формулы была сокращена. Но эта справедливо только в том случае, если сами коэффициенты девиации не претерпевают никаких изменений с изменением H . Однако известно, что два коэффициента B' и C' не остаются постоянными и в различных точках земной поверхности меняются с изменением H . Вследствие этого и девиация будет меняться по величине в зависимости от изменения района плавания, т. е. в зависимости от величины H .

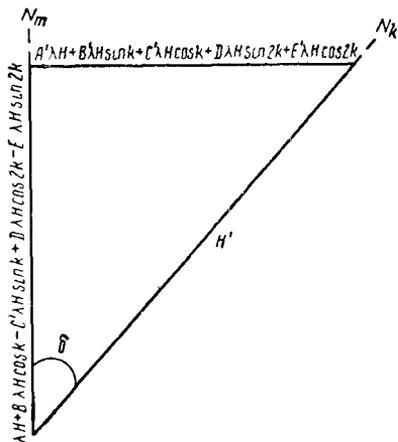


Рис. 11

Теперь важно выяснить, меняются ли судовые магнитные силы от изменения курса судна. Выражения самих сил показывают, что курс судна не является составной их частью. Поэтому величины этих сил на магнитный меридиан и на перпендикулярное ему направление выражаются через синусы и косинусы дуг, кратных магнитным курсам судна. Следовательно, большая часть судовых магнитных сил при изменении курса судна, оставаясь постоянной по величине, меняет свое направление.

Выясним, по каким направлениям действует каждая из судовых магнитных сил.

Начнем с силы λN . Предположим, что в выражениях (33) и (34) все коэффициенты девиации (а значит, и силы, вызывающие девиацию) равны нулю, кроме коэффициента λ , который, как ранее было обусловлено, всегда больше нуля. Тогда выражения (33) и (34) примут следующий вид:

$$H' \cos \delta = \lambda N, \quad H' \sin \delta = 0.$$

Второе из выражений может обратиться в нуль в двух случаях: когда $H' = 0$ или когда $\delta = 0$. Но H' не может быть нулем. Иначе, согласно первому выражению, в нуль обратилась бы сила λN . Но ни λ , ни N не равны нулю. Поэтому совместное решение обоих этих уравнений приводит к следующему:

$$\delta = 0, \quad H' = \lambda N.$$

Это решение должно быть истолковано так: когда девиация равна нулю, т. е. когда компасный меридиан совпадает с меридианом магнитным, то действовавшая ранее по компасному меридиану сила H' при его совпадении с меридианом магнитным становится равной силе λN . Иначе говоря, сила λN направлена по магнитному меридиану и всегда в сторону N_m .

Совпадая с магнитным меридианом, эта сила не оказывает отклоняющего действия на стрелки компаса, т. е. сама не производит девиации. В этом смысле она является полезной силой, и нужно стремиться, чтобы она была возможно больше по величине. Искусственное ее увеличение возможно за счет увеличения коэффициента λ . Например, если вокруг компаса на уровне стрелок поставить несколько радиальных железных брусков, то все они в совокупности будут характеризоваться двумя положительными параметрами a и e . Отсюда коэффициент

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2}$$

будет больше единицы. Но увеличение λ до двух единиц и более связано с большими практическими трудностями, поэтому на практике этот способ увеличения не получил распространения.

Устройство современных судов таково, что в тех местах, где устанавливаются магнитные компасы, коэффициент λ , как правило, мень-

ше единицы. Так, например, на верхнем мостике он равен 0,8—0,9, в рулевой рубке 0,7—0,8. Если $\lambda \leq 0,3$, то компас работает неудовлетворительно вследствие малости сил λH даже в средних магнитных широтах.

Выше было сказано, что сила λH девиации не производит, так как она направлена по магнитному меридиану. Но это не значит, что она не может косвенно влиять на величину девиации, если девиация вызвана другими силами.

Чтобы убедиться в этом, обратимся к выражениям (29) для

$$B' = \frac{cZ + P}{\lambda H}; \quad C' = \frac{fZ + Q}{\lambda H}.$$

Эти выражения ясно показывают, что изменение силы λH может вызвать изменение девиации.

Перейдем к рассмотрению силы $A'\lambda H$.

Положим в формулах (33) и (34) $B' = C' = D' = E' = 0$, $A' > 0$, тогда

$$H' \cos \delta = \lambda H, \quad H' \sin \delta = A'\lambda H.$$

Возведем правые и левые части равенств в квадрат и сложим их почленно:

$$(H')^2 = (\lambda H)^2 + (A'\lambda H)^2.$$

Полученное выражение напоминает известную теорему Пифагора. Так могут складываться два взаимно перпендикулярных отрезка. Поэтому если сила λH совпадает с магнитным меридианом, то сила $A'\lambda H$ перпендикулярна ему (рис. 12). Причем если $A' > 0$, то сила $A'\lambda H$ направлена к востоку от магнитного меридиана и ей приписывают знак плюс. Если же $A' < 0$, то сила действует к западу и ей приписывают знак минус.

Мы видим, что обе силы λH и $A'\lambda H$ сохраняют постоянные направления, не зависящие от курса судна. Но разница между ними в том, что сила $A'\lambda H$ в отличие от λH отклоняет стрелки компаса от магнитного меридиана, т. е. непосредственно сама производит девиацию.

Рассмотрим действия следующих сил. В формулах (33) и (34) положим $A' = C' = D' = E' = 0$; $B' > 0$.

После подстановки получим:

$$H' \cos \delta = \lambda H + B'\lambda H \cos k; \quad H' \sin \delta = B'\lambda H \sin k.$$

Как и прежде, возведем обе части этих равенств в квадрат и после сложения

$$(H')^2 = (\lambda H)^2 + (B'\lambda H)^2 + 2\lambda H B'\lambda H \cos k.$$

Полученный результат выражает собой квадрат стороны H' косоугольного треугольника (рис. 13), лежащей против угла $180^\circ - k$. Другими словами, это алгебраическое значение суммы двух векторов λH и $B'\lambda H$, образующих между собой угол k , равный магнитному курсу судна. Отсюда устанавливаем, что сила $B'\lambda H$ действует

относительно магнитного меридиана под углом, равным магнитному курсу судна (при положительном значении силы); если же сила отрицательна ($B' < 0$), то угол, образуемый ею с магнитным меридианом, равен $k \pm 180^\circ$. Находясь в зависимости от курса судна, эта сила на разных курсах будет принимать различные направления относительно магнитного меридиана и, следовательно, отклонять стрелки компаса, вызывая различную по величине девиацию.

Известно, что диаметральной плоскости судна составляет с магнитным меридианом угол, равный магнитному курсу. Поэтому сила $B'\lambda H$ должна всегда совпадать с диаметральной плоскостью, поворачиваясь относительно магнитного меридиана вместе с судном. Очевидно, что при положительном значении сила $B'\lambda H$ должна быть направлена в нос судна, при отрицательном — в корму.

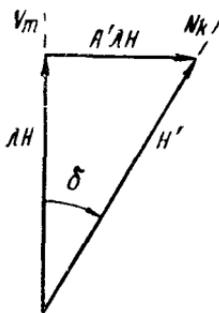


Рис 12

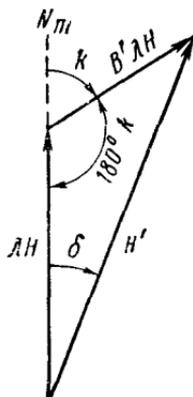


Рис 13

Теперь поставим следующее условие:

$$A' = B' = D' = E' = 0; \quad C' > 0.$$

Тогда формулы (33) и (34) и примут вид:

$$H' \cos \delta = \lambda H - C' \lambda H \sin k, \quad H' \sin \delta = C' \lambda H \cos k.$$

После возведения в квадрат и суммирования обеих частей этих выражений будем иметь:

$$(H')^2 = (\lambda H)^2 + (C' \lambda H)^2 - 2\lambda H C' \lambda H \sin k.$$

Сделаем замену $\sin k = -\cos(k + 90^\circ)$, тогда результат сложения будет аналогичен тому, который мы имели в предыдущем случае при рассмотрении действия силы $B'\lambda H$, с той лишь разницей, что аргумент косинуса в этом случае отличается на 90° :

$$(H')^2 = (\lambda H)^2 + (C' \lambda H)^2 + 2\lambda H C' \lambda H \cos(k + 90^\circ).$$

Следовательно, сила $C'\lambda H$ перпендикулярна силе $B'\lambda H$ и составляет с магнитным меридианом угол, равный магнитному курсу судна плюс

90° (рис. 14). Если эта сила отрицательна ($C' < 0$), то ее направление относительно магнитного меридиана определяется углом ($k - 90^\circ$).

В судовых координатных осях она не меняет своего направления и всегда перпендикулярна диаметральной плоскости судна. В случаях $C' > 0$ она действует в правый борт, а когда $C' < 0$ — в левый.

Положим в формулах (33) и (34) $A' = B' = C' = E' = 0$; $D' > 0$, тогда

$$H' \cos \delta = \lambda H + D' \lambda H \cos 2k; \quad H' \sin \delta = D' \lambda H \sin 2k.$$

Возведем в квадрат обе части этих уравнений и сложим их:

$$(H')^2 = (\lambda H)^2 + (D' \lambda H)^2 + 2\lambda H D' \lambda H \cos 2k.$$

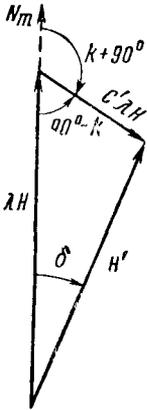


Рис. 14

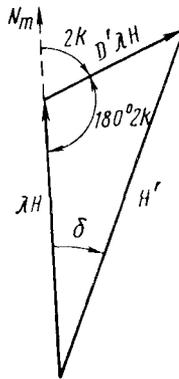


Рис. 15

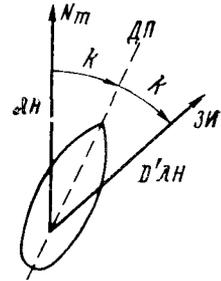


Рис. 16

Перед нами та же формула квадрата стороны H' косоугольного треугольника. Эта сторона в данном случае лежит против угла $180^\circ - 2k$ (рис. 15). Поэтому, если λH направлена по магнитному меридиану, то $D' \lambda H$ с магнитным меридианом, образует угол $2k$, равный удвоенному магнитному курсу судна. В случае отрицательного значения силы $D' \lambda H$ ее направление относительно магнитного меридиана определяется углом $2k \pm 180^\circ$.

Сила $D' \lambda H$ отличается от всех рассмотренных ранее сил тем, что ее направление с изменением курса изменяется одновременно как относительно магнитного меридиана, так и относительно диаметральной плоскости судна. Если судно, изменяя курсы на циркуляции, описывает полную окружность, то сила $D' \lambda H$, как радиус-вектор, успевае за это время обернуться два раза по окружности.

Напомним, что силы λH и $A' \lambda H$ изменяют свое направление только относительно диаметральной плоскости судна, оставаясь неизменными по отношению к магнитному меридиану, а силы $B' \lambda H$ и $C' \lambda H$, наоборот, меняются по направлению только относительно магнитного меридиана, оставаясь неизменными по отношению к диаметральной плоскости судна.

Выше отмечалось, что диаметральной плоскости судна составляет с плоскостью магнитного меридиана угол, равный магнитному курсу. Если же при положительном значении сила $D'\lambda H$ составляет с магнитным меридианом угол, определяемый двойным магнитным курсом, то диаметральной плоскости судна должна являться биссектрисой угла, образованного положительным значением силы $D'\lambda H$ и магнитным меридианом (рис. 16).

Представим себе, что с диаметральной плоскостью совмещена зеркальная поверхность, тогда можно сказать, что положительное направление силы $D'\lambda H$ определяется как *зеркальное изображение* магнитного меридиана в диаметральной плоскости судна.

Остается определить направление силы $E'\lambda H$.

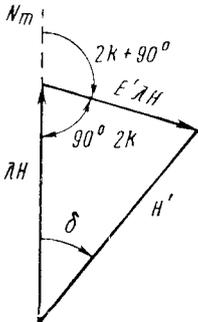


Рис. 17

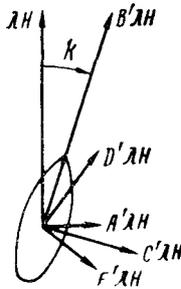


Рис. 18

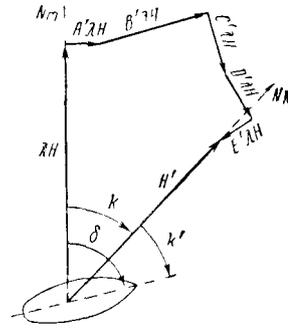


Рис. 19

Положим

$$A' = B' = C' = D' = 0; \quad E' > 0.$$

Тогда по формулам (33) и (34):

$$H' \cos \delta = \lambda H - E' \lambda H \sin 2k; \quad H' \sin \delta = E' \lambda H \cos 2k.$$

Поступая, как и в предыдущих случаях, будем иметь

$$(H')^2 = (\lambda H)^2 + (E' \lambda H)^2 - 2 \lambda H E' \lambda H \sin 2k,$$

или после замены синуса

$$(H')^2 = (\lambda H)^2 + (E' \lambda H)^2 + 2 \lambda H E' \lambda H \cos (2k + 90^\circ).$$

Отсюда заключаем, что при положительном значении сила $E'\lambda H$ направлена к магнитному меридиану под углом, равным двойному магнитному курсу плюс 90° (рис. 17). Если же сила отрицательна, то ее направление определяется углом $(2k - 90^\circ)$.

Заметим, что сила $E'\lambda H$ перпендикулярна силе $D'\lambda H$, и если она положительна, то повернута вправо от положительного направления силы $D'\lambda H$, если отрицательна, то — влево. Изменяя свое направление на различных курсах, эта сила производит девиацию. Аналогично силе $D'\lambda H$, она описывает два раза окружность при изменении курса судна на 360° .

Дадим сводку положительных направлений всех шести судовых магнитных сил:

λH — по магнитному меридиану к северу;

$A'\lambda H$ — перпендикулярно магнитному меридиану, к востоку;

$B'\lambda H$ — под углом к магнитному меридиану, равным магнитному курсу судна;

$C'\lambda H$ — под углом к магнитному меридиану, равным магнитному курсу плюс 90° ;

$D'\lambda H$ — под углом к магнитному меридиану, равным двойному магнитному курсу судна;

$E'\lambda H$ — под углом к магнитному меридиану, равным двойному магнитному курсу плюс 90° .

Примем точку приложения судовых магнитных сил в центре компаса, а сами силы будем считать положительными. Графически эти силы могут быть представлены в виде расходящегося пучка прямых, каждая из которых имеет свое направление в соответствии с курсом судна (рис. 18). Исключение составляют только две силы — λH и $A'\lambda H$, направления которых не зависят от курса.

Если воспользоваться правилами геометрического сложения отрезков, то можно построить многоугольник судовых магнитных сил для данного курса (рис. 19). Замыкающей этого многоугольника является равнодействующая H' , которая определяет направление компасного меридиана.

Пользуясь рис. 19, можно без особого труда спроектировать судовые магнитные силы на направление компасного меридиана и на перпендикулярное ему направление¹. Но прежде чем приступить к проектированию, условимся о правиле знаков и счете углов. За основную ось, на которую ведется проектирование, принимаем компасный меридиан; поэтому в процессе проектирования углы должны отсчитываться от компасного меридиана: по часовой стрелке — со знаком плюс, против часовой стрелки — со знаком минус.

Компасный курс k' всегда считается от компасного меридиана по часовой стрелке, поэтому ему припишем знак плюс. Девияция δ , которую принято отсчитывать от магнитного меридиана к востоку или западу, при отсчете от компасного меридиана (в обратном направлении) должна изменить знак на обратный.

На рис. 19 девияция восточная, положительная. Относительно компасного меридиана она западная, отрицательная. Следовательно, сила λH , которая составляет с компасным меридианом угол — δ , будет иметь проекцию на этот меридиан, равную $\lambda H \cos(-\delta)$. Сила $A'\lambda H$ перпендикулярна силе λH и составляет с ней угол $+90^\circ$, поэтому проекция силы $A'\lambda H$ на компасный меридиан равна

$$A'\lambda H \cos(90^\circ - \delta).$$

¹ Подобный способ был использован при выводе формул (33) и (34), где проектирование производилось на направление магнитного меридиана и на перпендикулярное ему направление.

Положительная сила $B'\lambda H$ направлена под углом k' к компасному меридиану. Значит ее проекция на меридиан выражается $B'\lambda H \cos k'$. Перпендикулярная ей сила $C'\lambda H$, составляющая с ней угол $+90^\circ$, будет иметь проекцию на компасный меридиан $C'\lambda H \cos (90^\circ + k')$. Наконец, положительная сила $D'\lambda H$ составляет с компасным меридианом угол $k' \pm k$ или $2k' + \delta$. Поэтому ее проекция равна $D'\lambda H \cos (2k' + \delta)$, а проекция перпендикулярной ей силы $E'\lambda H$, действующей под углом $+90^\circ$, определится как $E'\lambda H \cos (90^\circ + 2k' + \delta)$.

Если все проекции сложить, то в результате получим замыкающую H' многоугольника сил, которая является равнодействующей этих сил:

$$\begin{aligned} H' \cos 0^\circ = & \lambda H \cos (-\delta) + A'\lambda H \cos (90^\circ - \delta) + B'\lambda H \cos k' + \\ & + C'\lambda H \cos (90^\circ + k') + D'\lambda H \cos (2k' + \delta) + \\ & + E'\lambda H \cos (90^\circ + 2k' + \delta). \end{aligned} \quad (35)$$

Упростим это выражение на основании известных свойств тригонометрических функций:

$$\begin{aligned} H' = & \lambda H \cos \delta + A'\lambda H \sin \delta + B'\lambda H \cos k' - C'\lambda H \sin k' + \\ & + D'\lambda H \cos (2k' + \delta) - E'\lambda H \sin (2k' + \delta). \end{aligned}$$

Эта формула применяется в решении некоторых задач, о которых будет сказано в дальнейшем изложении курса.

Для того чтобы найти сумму проекций на направление, перпендикулярное компасному меридиану, нужно в выражении (35) заменить косинусы на синусы соответствующих углов, включая и угол 0° . Тогда получим известную уже формулу (32) синуса девиации, выведенную в предыдущей главе:

$$\begin{aligned} H' \sin 0^\circ = & \lambda H \sin (-\delta) + A'\lambda H \sin (90^\circ - \delta) + B'\lambda H \sin k' + \\ & + C'\lambda H \sin (90^\circ + k') + D'\lambda H \sin (2k' + \delta) + E'\lambda H \sin (90^\circ + 2k' + \delta). \end{aligned}$$

Или по свойству тригонометрических функций:

$$\begin{aligned} 0 = & -\lambda H \sin \delta + A'\lambda H \cos \delta + B'\lambda H \sin k' + C'\lambda H \cos k' + \\ & + D'\lambda H \sin (2k' + \delta) + E'\lambda H \cos (2k' + \delta), \end{aligned}$$

отсюда окончательно

$$\begin{aligned} \sin \delta = & A' \cos \delta + B' \sin k' + C' \cos k' + D' \sin (2k' + \delta) + \\ & + E' \cos (2k' + \delta). \end{aligned}$$

Это является хорошим контролем произведенного ранее вывода формулы.

§ 10. ХАРАКТЕР ДЕВИАЦИЙ, ПРОИЗВОДИМЫХ СУДОВЫМИ МАГНИТНЫМИ СИЛАМИ

Предположим, что в формуле (32) синуса девиации все коэффициенты равны нулю, кроме коэффициента A' , тогда эта формула примет вид:

$$\operatorname{tg} \delta = A'.$$

Приравнивая коэффициенты девиации нулю, кроме коэффициента A' , мы тем самым полагаем, что на судне в данной точке действуют две силы: λH , которая направлена по магнитному меридиану, и перпендикулярная ей положительная сила $A'\lambda H$, т. е. направленная в данном случае к востоку (см. рис. 12).

Если воспользуемся рисунком и образуем отношение представленных на нем сил, как катетов прямоугольного треугольника, то получим предыдущую формулу чисто геометрическим путем:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{A'\lambda H}{\lambda H} = A'.$$

Формула показывает, что тангенс девиации, возникшей от действия силы $A'\lambda H$, равен постоянной величине A' . Следовательно, сила $A'\lambda H$ производит *постоянную* по величине девиацию, не зависящую от курса судна. Отсюда коэффициент A' носит название коэффициента постоянной девиации.

Эта девиация проявляет себя как погрешность компаса, одинаковая по величине и знаку на всех курсах

$$\delta = \operatorname{arctg} A'. \quad (36)$$

График постоянной девиации показан на рис. 20, где по горизонтальной оси отложен курс судна, а по вертикальной — девиация при $A' > 0$.

Если в формуле (32) положим все коэффициенты девиации равными нулю, кроме коэффициента B' , то

$$\sin \delta = B' \sin k'.$$

Решим это выражение относительно δ :

$$\delta = \operatorname{arcsin}(B' \sin k'). \quad (37)$$

Очевидно, что сила $B'\lambda H$ производит девиацию, которая не остается постоянной и изменяется в зависимости от изменения курса судна. Графики изменения девиации в зависимости от компасного курса показаны на рис. 21, где принято $B' > 0$. Из рисунка видно, что при изменении курса судна на 360° девиация дважды меняет свой знак, переходя два раза через нуль. При этом на одной половине окружности она имеет один знак, а на другой половине — другой. Поэтому она получила название *полукруговой* девиации, а B' — коэффициента полукруговой девиации, происходящей от силы $B'\lambda H$.

Отличительным признаком полукруговой девиации является то, что на обратных курсах она имеет противоположные знаки.

Из рисунка видно также, что с уменьшением коэффициента B' кривая девиации приобретает очертания синусоиды. И действительно, разложим выражение (37) в ряд по синусам компасных курсов:

$$\arcsin(B' \sin k') = B' \sin k' + \frac{(B' \sin k')^3}{6} + \dots$$

Если коэффициент B' мал, то можно ограничиться первым членом разложения. Отсюда находим, что если сила $B'\lambda H$ мала, то полукруговая девиация, возникающая от этой силы, изменяется с изменением компасного курса по закону синуса:

$$\delta^\circ = \frac{B'}{\text{arc } 1^\circ} \sin k'.$$

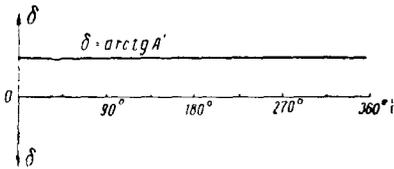


Рис. 20

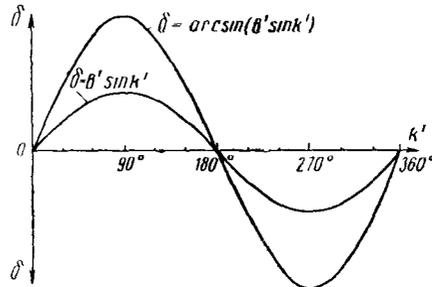


Рис. 21

Подсчет показывает, что ошибка от такого допущения не превышает $\pm 0^\circ,1$, если $|B'| < 0,225$, или $|\delta| < 13^\circ$.

Чтобы решить вопрос о том, на каких компасных курсах девиация будет максимальной, нужно в формулу (37) подставить максимальное значение синуса курса, равное единице.

$$\delta_{\max} = \arcsin B'.$$

Это максимальное значение соответствует компасным курсам 90° или 279° .

Ранее установленное понятие точных коэффициентов девиации получает здесь новое толкование: точный коэффициент B' равен синусу максимальной девиации, производимой силой $B'\lambda H$:

$$\sin \delta_{\max} = B'.$$

Перейдем к рассмотрению девиации, возникающей от силы $C'\lambda H$.

Положим в формуле (32) все коэффициенты девиации, кроме C' , равными нулю

$$\sin \delta = C' \cos k'.$$

Решим это уравнение относительно δ :

$$\delta = \arcsin(C' \cos k'). \quad (38)$$

Графики этой девиации приведены на рис. 22, где принято $C' > 0$. Из рисунка видно, что при изменении курса судна от 0 до 360° девиация, так же как в предыдущем случае, два раза переходит через нуль, меняя дважды свой знак. Поэтому она тоже получила название *полукруговой* девиации, а коэффициент C' — коэффициента полукруговой девиации, происходящей от силы $C'\lambda H$.

Свойство, присущее полукруговой девиации, сохраняется и здесь: девиация на обратных курсах имеет противоположные знаки.

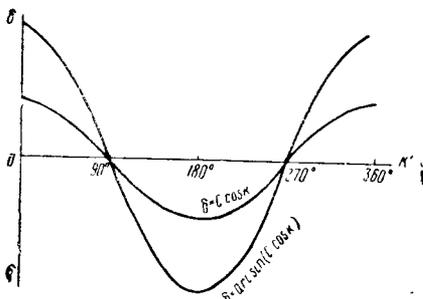


Рис. 22

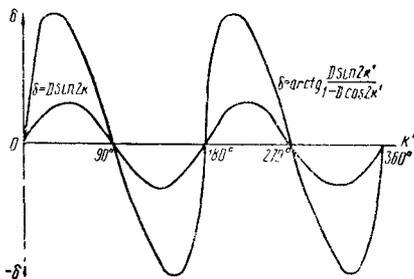


Рис. 23

Как видно из того же рисунка, по мере уменьшения коэффициента C' , кривая девиации все больше приближается к косинусоиде, принимая в конце концов ее очертания. Это подтверждается, если выражение (38) разложить в ряд.

При малых значениях C' можно ограничиться первым членом разложения:

$$\delta^\circ = \frac{C'}{\arcsin 1^\circ} \cos k',$$

который показывает, что изменение полукруговой девиации с курсом носит характер косинусоиды.

Чтобы определить компасные курсы, на которых девиация принимает максимальные значения, обратимся еще раз к формуле (38). Очевидно, что эти максимумы проявятся на компасных курсах 0 или 180°, так как в этих случаях косинус курса обращается в единицу и девиация

$$\delta_{\max} = \arcsin C'.$$

Отсюда получаем определение точного коэффициента C' как синуса максимальной девиации от силы $C'\lambda H$:

$$\sin \delta_{\max} = C'.$$

Теперь вновь вернемся к формуле (32) и обратим в нуль все коэффициенты девиации, входящие в эту формулу, за исключением коэффициента D' . Тогда

$$\sin \delta = D' \sin(2k' + \delta). \quad (39)$$

Решим это уравнение относительно δ . Для этого раскроем синус суммы:

$$\sin \delta = D' (\sin 2k' \cos \delta + \cos 2k' \sin \delta),$$

произведем перегруппировку слагаемых:

$$\sin \delta (1 - D' \cos 2k') = D' \sin 2k' \cos \delta,$$

разделим правую и левую части на $\cos \delta (1 - D' \cos 2k')$:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{D' \sin 2k'}{1 - D' \cos 2k'},$$

Тогда окончательно

$$\delta = \operatorname{arctg} \frac{D' \sin 2k'}{1 - D' \cos 2k'}. \quad (40)$$

Представим результат решения в виде графика (рис. 23), где $D' > 0$. Из рисунка видно, что девиация, производимая силой $D'\lambda H$, при изменении курса на 360° четыре раза меняет свой знак, сохраняя его неизменным в пределах только четверти окружности. Поэтому она получила название *четвертной девиации*, а D' — коэффициента четвертной девиации, происходящей от силы $D'\lambda H$.

Отличительным свойством этой девиации является то, что на обратных курсах она имеет всегда одинаковые знаки.

График показывает, что чем меньше величина D' , тем кривая девиации ближе к синусоиде. Это подтверждается разложением формулы (40) в ряд по синусам дуг, кратных компасным курсам, т. е.

$$\operatorname{arctg} \frac{D' \sin 2k'}{1 + D' \cos 2k'} = D' \sin 2k' + \frac{(D')^2}{2} \sin 4k' + \dots$$

При малом значении D' можно ограничиться первым членом разложения:

$$\delta^\circ = \frac{D'}{\operatorname{arc} 1^\circ} \sin 2k'.$$

Если девиация не превышает по своей величине $\pm 3^\circ,5$, то ошибка от такого допущения всегда меньше $\pm 0^\circ,1$.

Четвертная девиация обладает еще одной особенностью. В отличие от полукруговой девиации, компасные курсы, на которых она проявляет себя максимальным образом, у нее непостоянны и зависят от величины самой девиации.

Действительно, рассмотрим формулу (39). Максимумы девиации возможны, когда $2k' + \delta = n \frac{\pi}{2}$, где n — нечетное число, так как

в этом случае синус в правой части формулы (39) обращается в единицу, а сама формула принимает вид:

$$\sin \delta_{\max} = D',$$

т. е. синус максимальной четвертной девиации, производимой силой $D'\lambda H$, равен точному коэффициенту D' .

Зададим несколько значений n :

$$2k' + \delta_{\max} = \frac{\pi}{2} = 90^\circ; \quad 2k' + \delta_{\max} = 3 \frac{\pi}{2} = 270^\circ;$$

$$2k' + \delta_{\max} = 5 \frac{\pi}{2} = 450^\circ; \quad 2k' + \delta_{\max} = 7 \frac{\pi}{2} = 630^\circ.$$

Отсюда находим компасные курсы максимальной девиации:

$$1) \quad k' = 45^\circ - \frac{\delta_{\max}}{2}; \quad 3) \quad k' = 225^\circ - \frac{\delta_{\max}}{2};$$

$$2) \quad k' = 135^\circ - \frac{\delta_{\max}}{2}; \quad 4) \quad k' = 315^\circ - \frac{\delta_{\max}}{2}.$$

При дальнейшем увеличении числа n курсы повторяются. Следовательно, при изменении курса судна на 360° четвертная девиация от силы $D'\lambda H$ имеет четыре максимума. И чем меньше сама девиация, тем эти максимумы наблюдаются на курсах, близких к четвертным. Нужно подчеркнуть, что формулы для расчета курсов максимальной девиации являются алгебраическими, т. е. при пользовании ими необходимо учитывать знаки самой девиации.

Возьмем в качестве примера вторую формулу:

$$k' = 135^\circ - \frac{\delta_{\max}}{2}.$$

Как показывает график (см. рис. 23), при положительном значении D' девиация на курсе 135° отрицательна, поэтому

$$k' = 135^\circ - \left(-\frac{\delta_{\max}}{2} \right) = 135^\circ + \frac{\delta_{\max}}{2}.$$

При отрицательном D' девиация на том же курсе положительна. Отсюда

$$k' = 135^\circ - \frac{\delta_{\max}}{2}.$$

Рассмотрим девиацию, производимую силой $E'\lambda H$. Положим, что в формуле (32) только один коэффициент E' не равен нулю, тогда

$$\sin \delta = E' \cos (2k' + \delta). \quad (41)$$

Пользуясь точно таким же приемом, как в предыдущем случае, приведем формулу (39) к следующему виду:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{E' \cos 2k'}{1 + E' \sin 2k'}.$$

Решим это уравнение относительно δ :

$$\delta = \operatorname{arctg} \frac{E' \cos 2k'}{1 + E' \sin 2k'}. \quad (42)$$

Результат решения изобразим графически для случая $E' > 0$ (рис. 24). Из графика устанавливаем, что девиация от силы $E' \lambda H$ при изменении курса судна на 360° четыре раза меняет знак. Эта девиация называется *четвертной*, а E' — коэффициентом четвертной девиации, происходящей от силы $E' \lambda H$.

Общее свойство четвертной девиации на обратных курсах сохранять знаки обнаруживается и здесь.

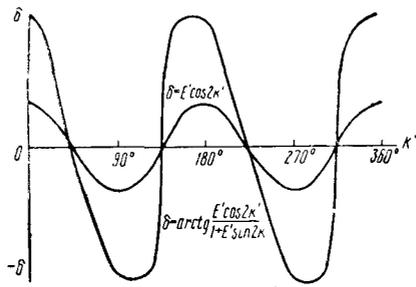


Рис. 24

При малом значении E' кривая девиации приобретает характер косинусоиды. Это подтверждается разложением формулы (42) в ряд:

$$\operatorname{arctg} \frac{E' \cos 2k'}{1 + E' \sin 2k'} = E' \cos 2k' - \frac{(E')^2}{2} \sin 4k' + \dots$$

или

$$\delta^\circ = \frac{E'}{\operatorname{arc} 1^\circ} \cos 2k'.$$

Для выяснения курсов максимальных девиаций воспользуемся формулой (41). По этой формуле условие максимума определяется так:

$$2k' + \delta = n\pi, \quad n = 1, 2, 3, 4.$$

В этом случае в правой части формулы (41) косинус обращается в единицу, а сама формула приобретает вид

$$\sin \delta_{\max} = E',$$

т. е. синус максимальной девиации от силы $E' \lambda H$ равен точному коэффициенту E' .

Напишем условия максимума, задавая n разные значения:

$$\begin{aligned} 2k' + \delta_{\max} &= \pi = 180^\circ; & 2k' + \delta_{\max} &= 3\pi = 540^\circ; \\ 2k' + \delta_{\max} &= 2\pi = 360^\circ; & 2k' + \delta_{\max} &= 4\pi = 720^\circ. \end{aligned}$$

Отсюда найдем компасные курсы максимальной девиации:

$$\begin{aligned} 1) \quad k' &= 90^\circ - \frac{\delta_{\max}}{2}; & 3) \quad k' &= 270^\circ - \frac{\delta_{\max}}{2}; \\ 2) \quad k' &= 180^\circ - \frac{\delta_{\max}}{2}; & 4) \quad k' &= 360^\circ - \frac{\delta_{\max}}{2}. \end{aligned}$$

При малых девиациях максимум наступает в непосредственной близости от главных румбов. При расчетах следует также учитывать знак девиации. Графики показывают (см. рис. 24), что если $E' > 0$, то на курсах 90° и 270° девиация отрицательна. Поэтому первое и третье равенства следует написать так:

$$k' = 90^\circ + \frac{\delta_{\max}}{2}; \quad k' = 270^\circ + \frac{\delta_{\max}}{2}.$$

Если $E' < 0$, второе и четвертое равенства будут иметь вид:

$$k' = 180^\circ + \frac{\delta_{\max}}{2}; \quad k' = 360^\circ + \frac{\delta_{\max}}{2}.$$

Глава III

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

§ 11. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ МАГНИТНОЙ СРЕЛКИ

Возьмем магнитную стрелку длиной $2l$, которая может поворачиваться вокруг вертикальной оси. Предположим, что в северном полюсе стрелки сосредоточено количество магнетизма $+m$, а в южном — m .

Если поместить такую стрелку в любую точку над поверхностью Земли (в пределах действия геомагнитного поля), то на нее будет действовать горизонтальная составляющая H земного магнетизма. При этом к полюсам стрелки окажутся приложенными силы $+mH$; $-mH$. Обе эти силы действуют в плоскости магнитного меридиана. Они одинаковы по абсолютной величине, но противоположны по направлению.

Таким образом, к магнитной стрелке, находящейся в однородном магнитном поле Земли, всегда приложена пара сил $+mH$ и $-mH$.

Предположим, что стрелка отклонена из плоскости магнитного меридиана на угол δ (рис. 25). При этом условии указанная пара сил создает вращающий момент P . Величина вращающего момента пары сил выражается произведением одной из сил на плечо пары.

В нашем случае имеем

$$P = mHAB,$$

где

$$AB = 2l \sin \delta,$$

следовательно,

$$P = 2lmH \sin \delta. \quad (43)$$

Произведение $2lm$ численно равно магнитному моменту M_c стрелки. Заменяя в формуле (43) $2lm$ на M_c , окончательно получим

$$P = M_c H \sin \delta. \quad (44)$$

Под действием вращающего момента P магнитная стрелка устанавливается в плоскости магнитного меридиана.

Выведенная формула показывает, что вращающий момент стрелки прямо пропорционален ее магнитному моменту, напряженности магнитного поля Земли в горизонтальной плоскости и синусу угла отклонения стрелки из плоскости магнитного меридиана.

Как известно, составляющая H земного магнетизма достигает наибольшей величины в зоне магнитного экватора. В связи с этим при прочих равных условиях вращающий момент магнитной стрелки имеет на экваторе максимальное значение. Здесь условия работы магнитного компаса наиболее благоприятны.

По мере увеличения магнитной широты горизонтальная составляющая H , а следовательно, и вращающий момент компасной стрелки уменьшаются. На магнитных полюсах вращающий момент P равен нулю, и в прилегающих к магнитным полюсам районах магнитный компас не работает.

Анализируя зависимость вращающего момента P от величины угла δ , легко убедиться, что при $\delta = 90^\circ$ момент P имеет максимальное значение, равное произведению $M_c H$. При малых углах отклонения стрелки из меридиана величина P мала. Так, у отечественных морских магнитных компасов марки КПМ (127 мм) при $M_c = 1500$ СГСМ¹ в средней магнитной широте (в районах, где $H = 0,15$ э) для $\delta = 1^\circ$ величина направляющего момента равна всего лишь 0,002—0,004 Гсм. Этот вращающийся момент можно сравнить

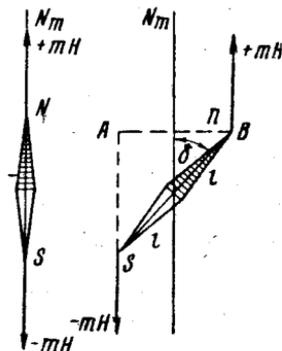


Рис. 25

¹ В системе СИ единицей магнитного момента M является 1 ам^2 . Для перевода величины M из единиц системы СГСМ в единицы системы СИ и наоборот надо пользоваться следующими соотношениями:

$$1 \text{ ед. СГСМ} = 79,6 \cdot 10^{-6} \text{ ам}^2;$$

$$1 \text{ ед. СИ} = 1 \text{ ам}^2 = \frac{10^6}{79,6} \text{ ед. СГСМ}.$$

Размерность магнитного момента в единицах СГСМ здесь не приводится, так как в магнитно-компасном деле пользоваться ею нет необходимости.

с механическим моментом, возникающим у весов с рычажком длиной 1 см, если на их чашку положить лоскуток папиросной бумаги. Даже при $\delta = 90^\circ$ в зоне магнитного экватора величина P не превосходит 0,6 Гсм.

Столь малые значения направляющих моментов заставляют конструкторов магнитных компасов принимать меры к доведению до минимума трения между опорной поверхностью топки картушки и шпилькой. Если трение превысит определенную величину, то компасная стрелка установится под некоторым углом к меридиану, называемым углом застоя.

При конструктивных расчетах величину угла застоя Δ (в радианах) определяют по формуле

$$\Delta = \frac{Q}{M_c H}, \quad (45)$$

где Q — момент трения топки о шпильку.

Формула (45) показывает, что угол застоя обратно пропорционален максимальному значению вращающего момента компасной стрелки.

Вращающий момент компаса можно увеличить за счет увеличения магнитного момента M_c стрелок, если для изготовления стрелок использовать специальные магнитные сплавы, обладающие большой коэрцитивной силой, а также увеличить объем стрелок. Но при возрастании магнитного момента стрелок увеличивается девиация от индукции (см. § 33), поэтому у компасов всех типов величина магнитного момента стрелок обычно не превосходит 1500—2500 СГСМ.

В настоящее время в связи с созданием «безындукционных» компенсаторов для уничтожения четвертной девиации появилась возможность сконструировать магнитный компас со значительно большим магнитным моментом. Такой компас будет более надежным и точным курсоуказателем.

§ 12. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТА НА МАГНИТНУЮ СТРЕЛКУ

В основу конструкции многих магнитометрических приборов положены закономерности взаимодействия магнита и магнитной стрелки, находящихся в однородном магнитном поле. К таким приборам относятся магнитометры и дефлекторные магнитометры, используемые для определения некоторых элементов магнитного поля Земли; дефлекторы различных систем, применяемые при уничтожении девиации, и некоторые другие приборы. Главная часть этих приборов — магнитная стрелка (система стрелок), а также измерительный магнит линейной формы, который может быть установлен в то или иное положение относительно магнитной стрелки и внешнего поля.

Рассмотрим действие линейного магнита на стрелку: расположенную в одной горизонтальной плоскости с магнитом (рис. 26). Пусть магнит NS установлен под некоторым углом относительно магнитного меридиана, а стрелка ns может вращаться вокруг вертикаль-

ной оси. Обозначим магнитный момент магнита NS через M ; угол между магнитным меридианом и прямой OO_1 , соединяющей центры магнита и стрелки, — через ψ , угол между осью магнита NS и линией OO_1 (линией центров) — φ ; угол между магнитным меридианом и осью стрелки ns — через δ ; расстояние между центрами магнита и стрелки — r ; расстояние между магнитными полюсами стрелки — $2l$.

Заменим магнит NS двумя магнитами N_1S_1 и N_2S_2 , расположив первый заменяющий магнит вдоль линии центров, а второй — перпендикулярно ей. Магнитные моменты M_1 и M_2 заменяющих магнитов выберем так, чтобы их геометрическая сумма была равна вектору

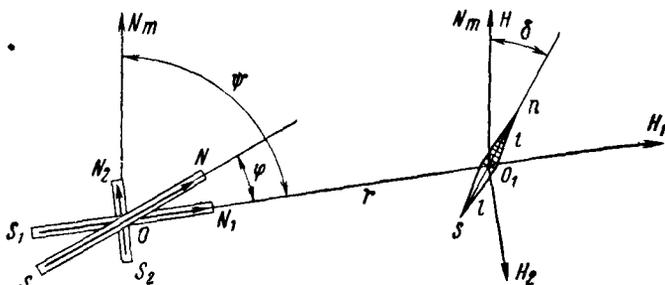


Рис 26

магнитного момента M основного магнита NS . Иными словами заменяющие магниты по своим магнитным свойствам в совокупности должны быть эквивалентны основному магниту. Эквивалентность будет обеспечена, если соблюсти следующие соотношения между магнитными моментами M , M_1 и M_2 :

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= M \cos \varphi \\ M_2 &= M \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

Напряженность магнитных полей магнитов N_1S_1 и N_2S_2 , а следовательно, и поля магнита NS в центре магнитной стрелки выражается формулами (9) и (12):

$$H_1 = \frac{2M_1}{r^3} \left(1 + \frac{P}{r^2} \right), \quad H_2 = \frac{M_2}{r^3} \left(1 - \frac{Q}{r^2} \right).$$

Если принять, что магнитное поле магнита NS в пространстве, занимаемом стрелкой, является однородным, то действие этого магнита на полюсы стрелки можно представить силами $+mH_1$ и $-mH_1$, $+mH_2$ и $-mH_2$, где $+m$ и $-m$ — количества магнетизма, сконцентрированные в северном и южном полюсах стрелки ns . Силы $+mH_1$ и $-mH_1$ равны по величине, но противоположны по направлению. То же самое следует сказать о силах $+mH_2$ и $-mH_2$. Таким образом, действие магнита NS на стрелку ns выражается двумя парами сил: $+mH_1$ и $-mH_1$, $+mH_2$ и $-mH_2$. Кроме поля магнита, на стрелку действует однородное магнитное поле Земли, действие которого в го-

ризонгальной плоскости также выражается парой сил. Обозначим их $+mH$ и $-mH$, где H — горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли.

Каждая из указанных трех пар сил создает вращающий момент, численно равный произведению одной из сил на плечо пары.

Величины вращающих моментов можно найти, проектируя силы mH_1 , mH_2 и mH на перпендикуляр к оси стрелки и умножая каждую из проекций на длину плеча $2l$ (рис. 27). При этом получим:

$$-H_1 2lm \sin(\psi - \delta),$$

$$-H_2 2lm \cos(\psi - \delta).$$

$$H 2lm \sin \delta.$$

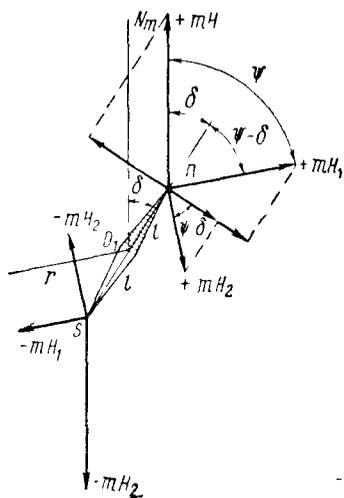


Рис 27

Под действием вращающих моментов стрелка придет в положение равновесия, установившись под некоторым углом относительно меридиана.

Положение равновесия выражается уравнением

$$-H_1 2lm \sin(\psi - \delta) - H_2 2lm \cos(\psi - \delta) + H 2lm \sin \delta = 0.$$

Разделив левую и правую части уравнения на $2lm$, получим

$$-H_1 \sin(\psi - \delta) - H_2 \cos(\psi - \delta) + H \sin \delta = 0.$$

Учитывая направления вращающих моментов, перепишем уравнение в следующем виде:

$$H \sin \delta = H_1 \sin(\psi - \delta) + H_2 \cos(\psi - \delta).$$

Для получения окончательного результата подставим в уравнение значения напряженностей H_1 и H_2 , а также значения M_1 и M_2 из равенства (46):

$$H \sin \delta = \frac{2M}{r^3} \left(1 + \frac{P}{r^2} \right) \cos \varphi \sin(\psi - \delta) + \frac{M}{r^3} \left(1 - \frac{Q}{r^2} \right) \sin \varphi \cos(\psi - \delta). \quad (47)$$

Формула (47) выражает общую закономерность действия магнита на магнитную стрелку, когда они расположены в одной горизонтальной плоскости. Отметим, что в формулу не входит магнитный момент стрелки. Это означает, что данная формула применима для магнитных компасов и приборов с любой системой стрелок. Она обеспечивает достаточную точность расчетов при условии, что поле отклоняющего магнита однородно, а его магнитный момент постоянен.

Однако эта формула неудобна, так как содержит большое число различных элементов и предусматривает значительное количество математических действий. В связи с этим при конструировании магнитометрических приборов и выполнении с их помощью магнитных наблюдений руководствуются частными случаями действия магнита на стрелку. Рассмотрим эти частные случаи.

Первое положение Гаусса. Расположим отклоняющий магнит NS так, чтобы его ось была перпендикулярна магнитному меридиану, а магнитную стрелку поместим на горизонтальной прямой OO_1 , являющейся продолжением оси магнита (рис. 28).

При таком расположении магнита и стрелки угол ψ между магнитным меридианом и линией центров OO_1 равен 90° ; угол φ между осью магнита NS и прямой OO_1 равен 0° .

Подставляя значения углов φ и ψ в формулу (47), получим

$$H \sin \delta = \frac{2M}{r^3} \left(1 + \frac{P}{r^2} \right) \sin (90^\circ - \delta),$$

или

$$H \sin \delta = \frac{2M}{r^3} \left(1 + \frac{P}{r^2} \right) \cos \delta.$$

Таким образом, при показанном на рис. 28 взаимном расположении магнита и стрелки на стрелку наряду с составляющей H действует только составляющая H_1 магнитного поля отклоняющего магнита. Разделив обе части равенства на $\cos \delta$, получим

$$H \operatorname{tg} \delta = \frac{2M}{r^3} \left(1 + \frac{P}{r^2} \right). \quad (48)$$

Если расстояние r между центрами магнита и стрелки значительно превосходит полудлину l магнита, то формулу первого положения Гаусса можно представить в более простом виде:

$$H \operatorname{tg} \delta = \frac{2M}{r^3}. \quad (49)$$

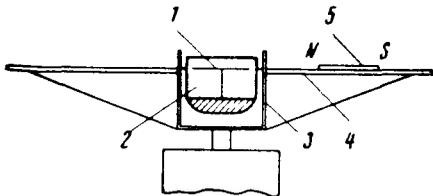


Рис 29

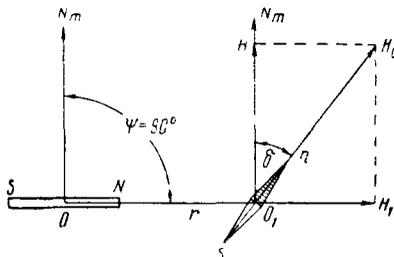


Рис 28

Рассмотренный случай действия магнита на стрелку используется на практике для определения горизонтальной составляющей H земного магнетизма по формуле

$$H = \frac{2M}{r^3} \left(1 + \frac{P}{r^2} \right) \operatorname{ctg} \delta.$$

В магнитно-компасном деле пер-

Первое положение Ламона наряду с первым положением Гаусса используется для определения горизонтальной составляющей H геомагнитного поля с помощью магнитометров и магнитного теодолита. Эти же теоретические положения были использованы при конструировании дефлектора Себайна, применявшегося ранее для измерения горизонтальных сил на берегу и на судне с целью уничтожения девиации.

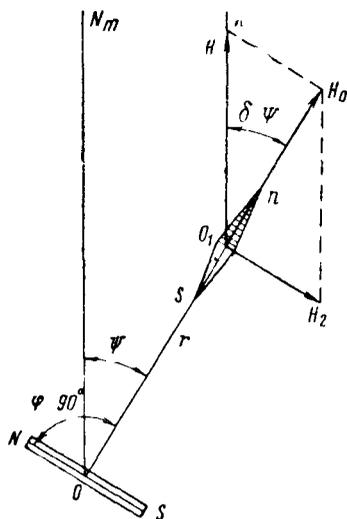


Рис 32

Второе положение Ламона. Пусть центр O_1 стрелки ns находится на перпендикуляре к оси магнита, восстановленном из точки O , а сам магнит располагается под некоторым углом к меридиану (рис. 32). Изменяя расстояние r , создадим в точке O_1 магнитное поле такой напряженности, при которой оси магнита и стрелки будут взаимно перпендикулярны. Тогда угол φ между осью магнита NS и линией центров OO_1 будет равен 90° , а угол ψ между магнитным меридианом и прямой OO_1 будет равен углу δ отклонения стрелки ns от меридиана.

При указанных значениях угла φ и разности $\psi - \delta = 0$ формула (47) представится в виде

$$H \sin \delta = \frac{M}{r^3} \left(1 - \frac{Q}{r^2} \right). \quad (55)$$

Следовательно, в данном частном случае на стрелку действует только составляющая H_2 магнитного поля магнита.

Когда расстояние r между центрами магнита NS и стрелки ns значительно больше полудлины l магнита, то для приближенных вычислений можно принимать

$$H \sin \delta = \frac{M}{r^3}. \quad (56)$$

Второе положение Ламона может быть применено для определения величины горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля.

§ 13. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ СИЛ МЕТОДОМ КОЛОНГА

В предыдущем параграфе был рассмотрен вопрос о взаимодействии магнита и стрелки, расположенных в одной горизонтальной плоскости. При уничтожении девиации магнитных компасов на отечест-

венном флоте применяются приборы и методы измерений магнитных полей, основанные на несколько иных теоретических положениях, которые были изучены крупным русским специалистом магнитно-компасного дела И. П. Колонгом и вошли в научную и учебную литературу под наименованием первого и второго положений Колонга.

Первое положение Колонга. Расположим магнит NS и магнитную стрелку ns в разных горизонтальных плоскостях так, чтобы прямая OO_1 , соединяющая центры стрелки и магнита, была вертикальна, а ось магнита совпадала с магнитным меридианом (рис. 33). При таком расположении магнита и стрелки к центру O_1 последней приложены составляющая H_2 однородного магнитного поля магнита NS и горизонтальная составляющая H земного магнетизма. Обе они действуют в плоскости меридиана, но их направления отличаются на 180° : составляющая H земного магнетизма направлена к N_m , а составляющая H_2 — к S_m . К полюсам стрелки ns приложены силы $+mH$ и $-mH$, $+mH_2$ и $-mH_2$.

В общем случае составляющие H и H_2 не равны друг другу по абсолютной величине и имеют равнодействующую, направленную по магнитному меридиану. Изменяя расстояние r между центрами магнита и стрелки, можно увеличивать или уменьшать величину составляющей H_2 , так как ее значение обратно пропорционально кубу (в первом приближении) расстояния r :

$$H_2 = \frac{M}{r^3} \left(1 - \frac{Q}{r^2} \right).$$

При некотором значении r составляющие H и H_2 станут равными по абсолютной величине и стрелка ns будет находиться в безразличном равновесии.

Если в этот момент стрелка составляет с меридианом некоторый угол δ , то ее равновесие выразится равенством вращающих моментов сил, приложенных к полюсам стрелки.

Из рис. 33 следует, что вращающий момент составляющей H земного магнетизма имеет величину $Hm2l \sin \delta$, а вращающий момент составляющей H_2 магнитного поля магнита $H_2m2l \sin \delta$.

Положению равновесия стрелки соответствует уравнение

$$Hm2l \sin \delta - H_2m2l \sin \delta = 0$$

или

$$H = H_2.$$

Подставляя в равенство значение силы H_2 , получим формулу первого положения Колонга

$$H = H_2 = \frac{M}{r^3} \left(1 - \frac{Q}{r^2} \right). \quad (57)$$

Первое положение Колонга служит теоретическим основанием измерения горизонтальных составляющих напряженности магнитного поля на берегу и на судне для уничтожения девиации. Этот метод

измерения можно назвать методом компенсации. Действительно, процесс измерения той или иной горизонтальной составляющей на основании первого положения Колонга сводится к перемещению измерительного магнита (изменению расстояния r) до тех пор, пока действующая на стрелку составляющая H_2 поля магнита не компенсирует измеряемую составляющую H . Достигнув компенсации, можно по известным для данного магнита величинам M и Q и расстоянию r между центрами магнита и стрелки вычислить величину H_2 , а значит, и величину составляющей H .

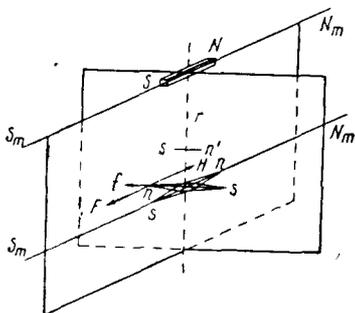


Рис. 33

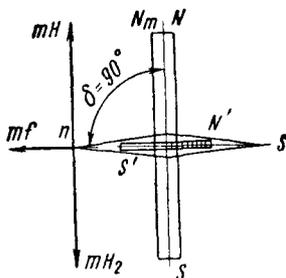


Рис. 34

При измерении горизонтальных сил методом Колонга возникает вопрос: как практически зафиксировать тот момент, когда наступает взаимная компенсация составляющих H и H_2 ? Колонг показал, что для этой цели необходимо воспользоваться вспомогательным магнитом $N'S'$, установив его под углом 90° к оси основного (измерительного) магнита NS (рис. 34). Такой магнит, находящийся в непосредственной близости к стрелке, действует на нее силой f , перпендикулярной меридиану. В тот момент, когда путем перемещения основного магнита будет достигнуто равенство абсолютных значений H_2 и измеряемой составляющей H , стрелка окажется под действием только силы f вспомогательного магнита. Сила f установит стрелку в плоскости, перпендикулярной магнитному меридиану, что и укажет на равенство составляющих H_2 и H . Стрелка может устанавливаться в конечном положении, поворачиваясь или по направлению часовой стрелки или в противоположном направлении, что зависит от расположения полюсов вспомогательного магнита.

Второе положение Колонга. Здесь рассматривается действие вертикального магнита NS на стрелку ns , которая располагается на продолжении оси магнита и может вращаться вокруг горизонтальной оси (рис. 35).

В этом случае напряженность магнитного поля в центре стрелки (точке O_1) выражается вертикальной составляющей Z земного магнетизма, горизонтальной составляющей H геомагнитного поля и составляющей H_1 поля магнита NS . При однородности поля магнита в пределах стрелки к ее полюсам приложены три пары сил: $(+mZ, -$

$-mZ$), $(+mH, -mH)$ и $(+mH_1, -mH_1)$, каждая из которых создает вращающий момент. Эти моменты имеют величину:

$$-Zm2l \cos I, \quad Hm2l \sin I$$

и

$$H_1 m2l \cos I.$$

Под действием вращающих моментов стрелка ns устанавливается в положение равновесия под некоторым углом I относительно горизонтальной плоскости. Равновесному положению стрелки соответствует уравнение

$$-Zm2l \cos I + Hm2l \sin I + H_1 m2l \cos I = 0.$$

Разделив уравнение почленно на $2lm$, получим

$$Z \cos I = H_1 \cos I + H \sin I.$$

Величина H_1 , а следовательно, и величина вращающего момента этой составляющей зависят от расстояния r между центрами магнита и стрелки. Изменение вращающего момента составляющей H_1 влечет за собой изменение угла I между осью стрелки и горизонтальной плоскостью. Перемещая магнит, можно установить его на таком расстоянии r , при котором стрелка установится горизонтально. Тогда угол I будет равен нулю и условие равновесия стрелки представится в следующем виде

$$Z = H_1$$

или

$$Z = \frac{2M}{r^3} \left(1 + \frac{P}{r^2} \right). \quad (58)$$

Таким образом, при $I = 0$ составляющая H_1 магнитного поля магнита NS численно равна вертикальной составляющей Z земного магнетизма.

Второе положение Колонга используется при девиационных работах для измерения вертикальных магнитных сил на берегу и на судне. Процесс измерения весьма прост и сводится к перемещению расположенного над стрелкой вертикального магнита до тех пор, пока стрелка не установится горизонтально. Тогда, зная величину магнитного момента M и измерив расстояние r , можно вычислить величину вертикальной составляющей Z или Z' .

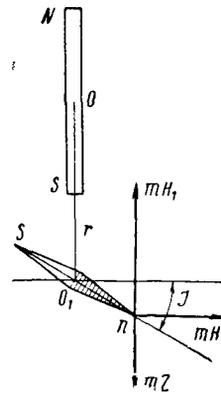


Рис. 35

§ 14. ПРИБОРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ УНИЧТОЖЕНИИ ДЕВИАЦИИ

Дефлектор Колонга и его использование. Конструкция дефлектора Колонга (рис. 36, а, б) обосновывается первым и вторым положениями Колонга, рассмотренными в предыдущем параграфе. Главной частью

компасе марки КПМ (127-мм компас) следует пользоваться индексом с пометкой 5".

Дефлектор хранится в деревянном футляре. В комплект прибора входят: отвертка для винтов, ключ для вывинчивания компасных шпилек, камень белорецкого кварца для заточки шпилек, лупа, магнит-успокоитель, запасные стопорный и соединительный винты, запасная нить для предметной мишени пеленгатора. Каждый экземпляр дефлектора снабжается аттестатом.

Измерение горизонтальных сил. Многие способы уничтожения девиации требуют измерений горизонтальной составляющей H магнитного поля Земли и равнодействующей H' всех горизонтальных сил, действующих на компас на судне. Первая из этих сил действует в плоскости магнитного меридиана, а вторая — в плоскости компасного меридиана.

При рассмотрении первого положения Колонга было отмечено, что измерение горизонтальной силы выполняется путем компенсации ее с помощью измерительного магнита. Если расположить магнит дефлектора в плоскости измеряемой силы, обратив его северный полюс в направлении этой силы, то, изменяя расстояние между измерительным магнитом и картушкой компаса, можно достичь равенства абсолютных значений силы магнита и измеряемой горизонтальной силы. Когда это равенство будет достигнуто, картушка компаса отклонится под действием вспомогательного магнита из начального положения, т. е. от плоскости меридиана, на 90° .

Перед измерением H или H' измерительный магнит нужно установить в гнездо каретки горизонтально, обратив северный конец магнита вправо от повернутого к наблюдателю маховика прибора; вспомогательный магнит устанавливают так, чтобы его северный конец был обращен к маховику дефлектора.

Измерение на берегу составляющей H земного магнетизма следует выполнять в таком порядке:

установить котелок компаса на девиационную треногу, расположив ее на возможно большем расстоянии от источников возмущающих магнитных полей;

поворачивая пеленгатор, совместить его визирную плоскость с плоскостью магнитного меридиана (при этом под призмой пеленгатора будет наблюдаться отсчет 180° картушки); заметить контрольный отсчет пеленгатора по азимутальному кругу котелка;

установить на чашку пеленгатора дефлектор, совместив ось измерительного магнита с визирной плоскостью (с плоскостью магнитного меридиана) и обратив северный конец магнита к северу; проверить положение пеленгатора по отсчету азимутального круга;

перемещая измерительный магнит, подвести под призму пеленгатора отсчет 270° картушки¹;

взять отсчет по шкале горизонтальных сил.

¹ Как уже указывалось ранее, под призму пеленгатора можно подводить и отсчет 90° картушки, но для этого вспомогательный магнит должен быть обращен к маховику дефлектора южным полюсом.

Аналогично выполняется измерение и судовой силы H' , но поскольку величина и направление этой силы изменяются при перемене компасного курса, работу нужно производить в таком порядке:

лечь на требуемый компасный курс;

установить пеленгатор в плоскости компасного меридиана, для чего повернуть пеленгатор так, чтобы под его призмой наблюдался отсчет 180° картушки; заметить отсчет пеленгатора по азимутальному кругу котелка;

установить на чашку пеленгатора дефлектор, ориентируя его так, чтобы ось измерительного магнита лежала в визирной плоскости (в плоскости компасного меридиана), а северный конец магнита был обращен к северу; проверить положение пеленгатора по отсчету на азимутальном круге котелка;

перемещая измерительный магнит, подвести под призму пеленгатора отсчет 270° (или 90°) картушки;

взять отсчет по шкале горизонтальных сил.

Так как точное удержание судна на требуемом курсе часто бывает затруднительным, то при измерении силы H' предпочитают устанавливать пеленгатор в плоскости меридиана не по отсчету 180° картушки, а по отсчетам азимутального круга. Так, например, для измерения силы H' на компасном курсе 0° пеленгатор устанавливают на отсчет 0° азимутальной шкалы; при измерении силы на курсе 90° — на отсчет 270° ; при измерении силы на курсе 270° — на отсчет 90° азимутального круга и т. д.

При измерении горизонтальных сил H и H' устанавливать пеленгатор в плоскости меридиана и подводить отсчет 270° (90°) картушки под призму нужно с точностью до $0^\circ,2$.

Измерение проекций горизонтальных сил. Некоторые способы уничтожения девиации требуют измерения проекций горизонтальной силы H' на судовые координатные оси. Проекция силы H' на ось x , лежащую в диаметральной плоскости, называется продольной проекцией и обозначается X' . Проекция силы H' на ось y , перпендикулярную ДП, называется поперечной и обозначается Y' .

Продольная проекция X' считается положительной, если она направлена из точки O (центр картушки компаса) к носу судна, и отрицательной, когда она направлена к корме. Положительная поперечная проекция Y' направлена от центра картушки к правому борту, а отрицательная — к левому.

Величины проекций выражаются формулами (см. § 8):

$$X' = H' \cos k'; \quad Y' = -H' \sin k',$$

где k' — компасный курс судна.

Измерение дефлектором проекций X' и Y' выполняется аналогично измерению любой другой горизонтальной силы. Это означает, что при измерении проекций измерительный магнит дефлектора нужно располагать над компасной стрелкой горизонтально и так, чтобы ось магнита находилась в плоскости измеряемой проекции, а северный конец

магнита был обращен в сторону действия проекции. Так, например, для измерения положительной проекции X' измерительный магнит необходимо расположить в диаметральной плоскости, направив его северный конец к носу судна. Если измеряется поперечная проекция Y' , то дефлектор нужно установить на компас так, чтобы измерительный магнит был перпендикулярен диаметральной плоскости судна.

Поскольку положение дефлектора относительно диаметральной плоскости судна зависит от ориентировки пеленгатора, то при измерении проекций важно уметь правильно устанавливать пеленгатор в требуемое положение по отсчетам азимутального круга котелка. Напомним, что азимутальный круг имеет деления от 0 до 360° , причем нулевое деление шкалы обращено к корме судна. При измерении проекции X' на компасных курсах нордовой половины картушки (X' положительна) пеленгатор нужно установить на отсчет 0° азимутального круга; если же курсы судна располагаются в зюйдовой половине картушки (проекция X' отрицательна), то пеленгатор следует поставить на отсчет 180° .

При измерении поперечной проекции Y' на курсах в остовой половине картушки (проекция Y' отрицательна) пеленгатор должен быть установлен на отсчет 270° азимутального круга; если проекция Y' положительна, т. е. если курс судна располагается в вестовой половине картушки, то отсчет пеленгатора по азимутальной шкале должен быть равен 90° .

Сведем только что изложенные правила в табл. 1.

Таблица 1

Четверти, в которых находится курс судна	Знаки проекций		Отсчет пеленгатора по азимутальному кругу при измерении	
	X'	Y'	X'	Y'
NE	+	—	0°	270°
SE	—	—	180	270
SW	—	+	180	90
NW	+	+	0	90

Измерение проекций дефлектором Колонга имеет одну особенность — оно производится без вспомогательного магнита. Этот магнит не нужен при измерении проекций — его функции выполняет вторая, не измеряемая в данный момент проекция. Пусть, например, измеряется продольная проекция на компасном курсе 45° (рис. 37). В этом случае пеленгатор и дефлектор устанавливают в диаметральной плоскости судна, а измерительный магнит дефлектора обращают северным полюсом к носу судна.

Когда сила F измерительного магнита компенсирует измеряемую проекцию X' , картушка будет находиться под действием поперечной проекции Y' , которая подобно силе вспомогательного магнита уста-

новит картушку перпендикулярно диаметральной плоскости судна. При этом под призму пеленгатора подойдет отсчет 270° картушки, «сигнализируя» наблюдателю об окончании измерения.

Предположим теперь, что на том же курсе измеряется поперечная проекция. Пользуясь табл. 1, найдем, что в этом случае пеленгатор нужно установить на отсчет 270° азимутального круга, т. е. расположить его перпендикулярно диаметральной плоскости. Точно так же следует установить и измерительный магнит дефлектора, обратив его северный конец к левому борту. Для измерения проекции будем, как обычно, перемещать измерительный магнит дефлектора до тех пор пока сила F магнита не компенсирует проекцию Y' . В момент компенсации на картушку будет действовать только продольная проекция X' . Под ее влиянием картушка повернется в направлении часовой стрелки и установится своей осью NS в диаметральной плоскости судна, а под призму пеленгатора подойдет отсчет 90° картушки.

Построив аналогичные чертежи для других четвертных курсов, учащийся может самостоятельно прийти к следующим выводам.

1. На всех компасных курсах, кроме курсов, близких к главным, измерение проекций X' и Y' производится без вспомогательного магнита; на курсах, близких к главным, когда одна из проекций весьма мала, большую проекцию измеряют со вспомогательным магнитом, причем этот магнит устанавливают так, чтобы посылаемая им на картушку сила увеличила малую проекцию.

2. При измерении проекций X' и Y' под призму пеленгатора нужно подводить во всех случаях только отсчеты 270 или 90° картушки; для того чтобы определить, какой именно из этих двух отсчетов следует подвести под призму, полезно воспользоваться схематическим чертежом, подобным рис. 37.

Практически этот вопрос решается более просто: установив пеленгатор в нужное положение по азимутальному кругу, следует подводить под призму тот из указанных отсчетов (270 или 90°), который находится ближе к призме пеленгатора.

Кроме судовых проекций X' и Y' , во время девиационных работ бывает необходимо измерять проекции составляющей H земного магнетизма на ту или иную горизонтальную ось. Эти измерения производят на берегу в таком месте, где на картушку не влияют возмущающие магнитные поля.

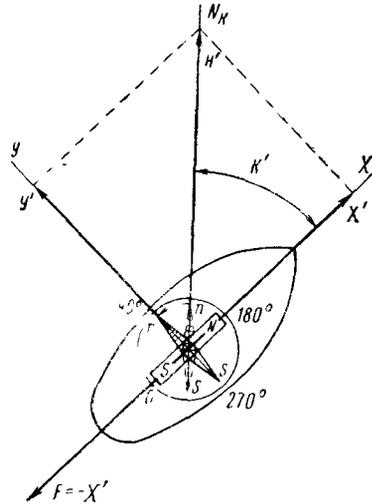


Рис. 37

системы располагается на линии подвеса. Для обеспечения этих требований картушку нужно систематически выверять перед началом девиационных работ. Однако и хорошо выверенная картушка в силу ее конструктивных недостатков не обеспечивает достаточной точности измерений. Обычно точность измерений вертикальных сил с помощью наклонной картушки не превышает 5—10 дефлекторных единиц.

Следует также отметить, что картушка не выдерживает длительной эксплуатации в судовых условиях и даже при самом аккуратном обращении быстро выходит из строя.

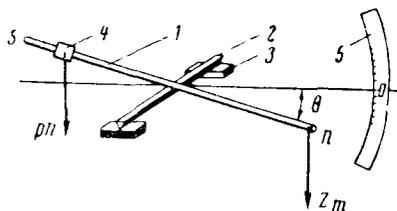


Рис. 40

Во время измерения вертикальных сил картушку помещают в креновый котелок (рис. 39). Этот котелок состоит из корпуса 1, крышки 4, чашки 3 для установки дефлектора и цапф 2 для установки котелка в нактоуз компаса. Внутри котелка имеется шпилька, служащая опорой для наклонной картушки.

Магнитные весы. Магнитными весами называют прибор, предназначенный для уничтожения креновой девиации. Принцип его работы во многом подобен действию обычных коромысловых весов. Отсюда прибор и получил свое наименование.

Схема устройства магнитных весов показана на рис. 40. Главной частью прибора является магнитная стрелка 1. Она снабжена горизонтальной осью 2, которая опирается на подпятники 3. На стрелке находится передвижной грузик 4, положение которого фиксируется по нанесенным на стрелке делениям, выражающим расстояние грузика от оси вращения. Прибор оснащен шкалой 5, по которой оценивается наклон стрелки относительно плоскости горизонта.

В береговых условиях на стрелку весов действует вертикальная составляющая Z магнитного поля Земли. Возникающий при этом вращающий момент имеет величину

$$Z2lm \cos \theta,$$

где $2l$ — расстояние между полюсами стрелки;

m — количество магнетизма, сосредоточенного в полюсе стрелки;

θ — угол между осью стрелки и плоскостью горизонта.

Передвижной грузик стрелки также создает вращающий момент. Но в отличие от первого вращающий момент грузика является механическим. Величина его определяется выражением

$$pn \cos \theta,$$

где p — вес грузика;

n — расстояние центра грузика от оси вращения, отсчитываемое по делениям стрелки.

Грузик всегда можно расположить так, чтобы создаваемый им момент был противоположен по направлению моменту вертикальной составляющей Z земного магнетизма. Для этого в северной магнитной широте грузик нужно поместить на южной половине стрелки, а в южной широте — на северной.

При определенном расстоянии n грузика от центра стрелки моменты составляющей Z и веса p станут равными по абсолютной величине и стрелка установится горизонтально. В этом случае будет справедливо соотношение

$$Z2lm = pn.$$

Обозначив $2lm$ через M_c , получим

$$ZM_c = pn.$$

Пользуясь последним равенством, можно по известным M_c , p и n определить величину составляющей Z . (Заметим, что такой прием измерения Z не нашел практического применения из-за возможного непостоянства магнитного момента стрелки и трудностей конструктивного характера).

Предположим теперь, что прибор помещен на судне и приложенная к стрелке вертикальная составляющая имеет величину Z' . При горизонтальном положении стрелки момент этой составляющей будет численно равен произведению $Z'M_c$. Чтобы создать равный механический момент, грузик нужно передвинуть на деление n' . Таким образом, будем иметь два соотношения:

$$ZM_c = pn$$

и

$$Z'M_c = pn'.$$

Разделив почленно второе выражение на первое, получим:

$$\frac{Z'}{Z} = \frac{n'}{n},$$

т. е. величины измеряемых сил пропорциональны отсчетам положения грузика на стрелке весов.

Отсюда

$$Z' = \frac{n'}{n} Z. \quad (59)$$

Эта формула позволяет получить относительную величину вертикальной составляющей Z' судового магнитного поля.

Как будет показано в гл. VI, уничтожение креновой девиации производится на магнитных курсах 90 или 270° путем доведения вертикальной составляющей судового магнитного поля до величины

$$Z' = \lambda(1 - D')Z.$$

Для того чтобы уничтожить креновую девиацию с помощью магнитных весов, необходимо выполнить следующее условие:

$$\frac{n'}{n} = \lambda(1 - D')$$

или

$$n' = \lambda(1 - D')n. \quad (60)$$

Отсчет n получают на берегу, уравновесив стрелку весов путем перемещения грузика. Величину n' вычисляют по известным значениям n и $\lambda(1 - D')$.

Если, установив грузик на отсчет n' , поместить весы в нактоуз вместо компасного котелка и с помощью кренового магнита привести стрелку прибора в горизонтальное положение, то креновая девиация будет уничтожена.

Таким способом уничтожают креновую девиацию на английском, японском и некоторых других иностранных флотах, используя магнитные весы различной конструкции.

Однако этот метод обладает некоторыми недостатками. Так, если судно, на котором выполняется работа, имеет постоянный крен, то приведение стрелки весов в горизонтальное положение будет произведено с ошибкой, равной величине крена. Это отрицательно скажется на точности уничтожения девиации.

Но самым крупным недостатком данного метода является то, что для его практического выполнения необходимо предварительно определить величину $\lambda(1 - D')$. Для этого, как мы увидим в дальнейшем, нужно произвести измерения горизонтальных сил на берегу и на судне с помощью дефлектора. В связи с тем что определение величины $\lambda(1 - D')$ отнимает много времени, часто, не производя никаких измерений, а полагаясь на собственный опыт, назначают ее в тех или иных пределах. В этих случаях уничтожение креновой девиации с помощью магнитных весов выполняется со столь большой ошибкой, что данный метод превращается в приближенный.

Судовой инклинометр. В 1955 г. В. П. Кожухов разработал новый метод уничтожения креновой девиации, основанный на сопоставлении величины магнитного наклона на берегу и на судне с помощью прибора, названного судовым инклинометром (рис. 41).

Основными частями этого прибора являются магнитная система, шкала, корпус и арретирные устройства.

Магнитная система состоит из двух цилиндрических магнитов 1, эквиполлюсы которых расположены под углом 30° к магнитной оси системы. Такое положение магнитов обеспечивает нечувствительность системы к неоднородным магнитным полям, которые могут действовать на прибор в судовых условиях.

Магнитный момент системы равен примерно 350 ед. СГСМ.

Магниты укреплены в рамке 2, имеющей четыре лопасти 3, демпфирующие колебания магнитной системы. На рамке установлены индексы 5 для отсчета показаний прибора по шкале. На цилиндрической части индексов нарезана резьба, на которую накручены балан-

сировочные гайки 4. Путем перемещения этих двух гаек магнитная система балансируется относительно поперечной оси. Для балансировки системы относительно продольной оси служат две гайки 6 на стержнях, укрепленных в поперечной плоскости магнитной системы. У идеально отбалансированного прибора центр тяжести магнитной системы располагается на ее оси вращения.

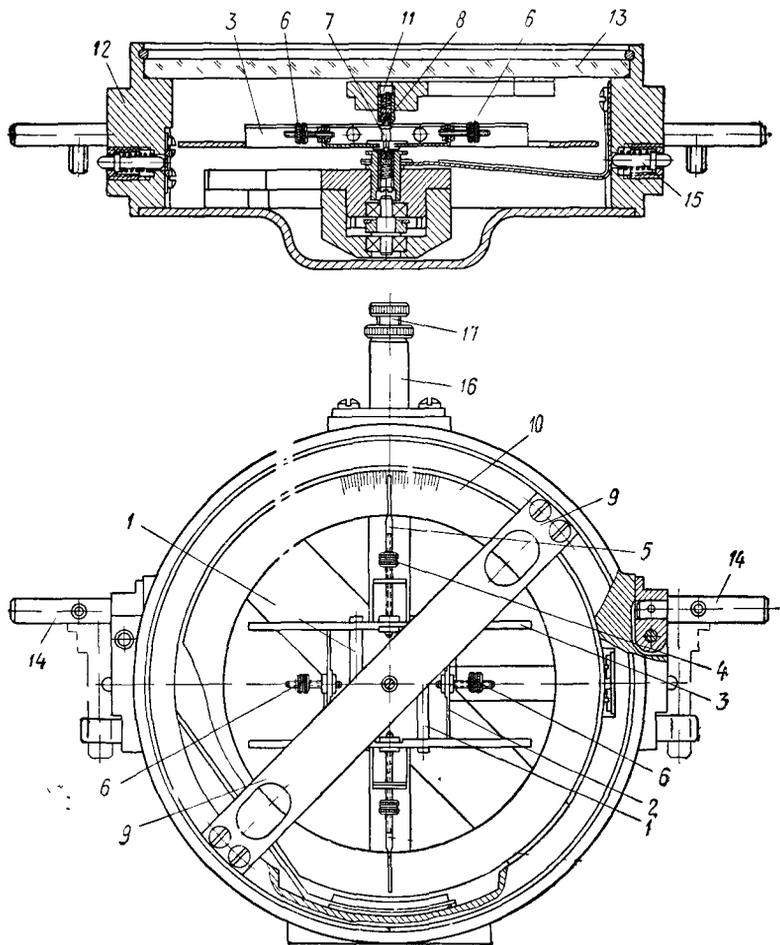


Рис. 41

В центре рамки укреплена ось 7 магнитной системы, концы оси вращаются в корундовых подпятниках 8, вмонтированных в мостик 9. Диск 10, на котором нанесена шкала для отсчета наклона, также имеет горизонтальную ось, вращающуюся в корундовых подшипниках. Шкала разбита по четвертям от 0 до 90°, причем нулевые деления

располагаются в горизонтальной плоскости даже при крене. Для этого диск со шкалой снабжен латунным грузом и является своего рода маятником. Цена деления шкалы 1° . Каждое десятое деление оцифровано.

Для регулирования трения в осях магнитной системы и диска со шкалой (для устранения застоя) предназначены футеры 11.

Магнитная система и шкала помещены в латунный корпус 12, закрываемый стеклянной крышкой 13. На боковых сторонах корпуса находятся приливы для установки съемных цапф 14, на которых инклинометр подвешивают в нактоуз компаса.

Прибор снабжен устройствами для арретирования магнитной системы и диска со шкалой. Арретеры срабатывают, когда цапфы прибора поворачиваются на шарнире к корпусу, нажимая на стержни 15. Когда цапфы повернуты в горизонтальное положение (прибор установлен в нактоуз), магнитная система и диск со шкалой снимаются с арретира.

В комплект инклинометра входит несколько пар съемных цапф различных размеров, что позволяет использовать его при работе на компасах разных систем. Кроме того, в комплект входит несколько видов подцапфенных опор.

В верхней части корпуса прибора установлена втулка 16 для компенсационного магнита, с помощью которого можно компенсировать вертикальную составляющую магнитного поля в том случае, если инклинометр предполагается использовать в режиме магнитных весов. Внутри втулки сделана резьба, на которую навинчивается пенал 17 с компенсационным магнитом. Этих магнитов в комплекте прибора четыре, и каждый из них имеет определенный магнитный момент. В зависимости от величины магнитного момента магниты пронумерованы порядковыми номерами. Магнит № 1 обладает наибольшим моментом, а № 4 — наименьшим. Магниты позволяют компенсировать вертикальную составляющую магнитного поля частично или полностью в любых возможных на судах магнитных условиях.

На одном из приливов корпуса нанесена риска, позволяющая при работе с прибором устанавливать его в одинаковое положение относительно меридиана, что имеет существенное значение в тех случаях, когда инклинометр перед работой не был выверен. В нижней части корпуса укреплен груз для придания инклинометру устойчивости в вертикальной плоскости.

Прибор хранится в деревянном футляре.

Измерение магнитногоклонения I на берегу

1. С помощью компасного котелка, установленного в вилку треноги, определить положение магнитного меридиана; повернуть вилку с котелком так, чтобы ее подцапфенные колодки (опоры) располагались в плоскости магнитного меридиана.

2. Установить в вилку взамен компасного котелка судовой инкли-

натор (при этом плоскость качаний магнитной системы прибора и его диска со шкалой будет располагаться в плоскости меридиана).

3. Через 1—1,5 мин, когда магнитная система придет в положение равновесия, взять отсчет по шкале. Этот отсчет будет соответствовать величине магнитного наклона I в данной точке поверхности Земли.

При измерении наклона можно поступить и несколько иначе: не пользоваться котелком и треногой, а, держа инклинометр в руках за цапфы, медленно поворачивать прибор вокруг вертикальной оси и следить за его показаниями. Минимальный отсчет магнитной системы по шкале укажет величину магнитного наклона I .

Измерение магнитного наклона I' на судне

1. Лечь на тот компасный или магнитный курс, на котором требуется измерить величину судового наклона.

2. Убрать из нактоуза котелок компаса и установить на его место инклинометр, используя входящие в комплект прибора съемные цапфы и опоры. Инклинометр необходимо установить в нактоуз так, чтобы плоскость качаний его магнитной системы находилась в плоскости компасного меридиана.

3. По прошествии 1—1,5 мин взять отсчет I' по шкале прибора.

Перед измерениями инклинометр следует выверить на берегу. Сначала производят проверку на застой. Инклинометр подвешивают в вилку треноги и приближенно совмещают плоскость качаний магнитной системы с плоскостью меридиана. После того как магнитная система прибора придет в положение равновесия, замечают отсчет I_1 по шкале. Затем с помощью одного из магнитов, входящих в комплект прибора, отклоняют магнитную систему на 1,5—2° в ту или иную сторону и, когда она вновь успокоится, замечают отсчет I_2 . При отсутствии застоя разность отсчетов I_1 и I_2 не будет превышать 0°, 3. Если разность больше, то следует футерами отрегулировать трение в осях. Проверку следует проделать дважды, отклоняя магнитную систему магнитом вначале, например, по часовой стрелке, а затем в обратном направлении.

Вторая выверка инклинометра предусматривает балансировку его магнитной системы. Для этого на берегу прибор устанавливают перпендикулярно плоскости магнитного меридиана и берут отсчет I_1 . Затем, не меняя положения вилки треноги, поворачивают прибор вокруг вертикальной оси на 180° и замечают отсчет I_2 . Если полученные отсчеты отличаются от 90°, то снимают стеклянную крышку и с помощью поперечных балансировочных гаек магнитной системы в несколько приемов добиваются равенства отсчетов 90°. После этого, установив инклинометр в плоскости магнитного меридиана, с помощью второй пары балансировочных гаек, которые расположены на продольной оси магнитной системы, доводят отсчет по прибору до величины, равной фактическому значению магнитного наклона I в данном районе.

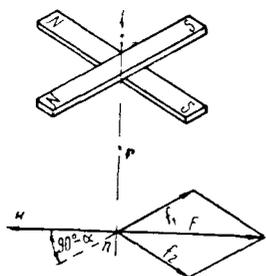


Рис 42

Судовой инклинатор заменяет при уничтожении креновой девиации комплект приборов: дефлектор, картушку с наклонными стрелками, креновой котелок, магниты для намагничивания.

Дефлектор с равномерной шкалой предназначен для измерения горизонтальных магнитных сил и их проекций на берегу и на судне. Принцип его работы заключается в следующем. Если два равных по силе горизонтальных магнита NS (рис. 42) одновременно поворачивать в противоположных направлениях на одинаковые углы вокруг вертикальной оси, то магниты будут действовать на магнитную стрелку некоторой горизонтальной силой F . Величина этой силы зависит от расстояния r и пропорциональна магнитному моменту магнитов и синусу угла α поворота магнитов относительно нейтрального положения (нейтральным является такое положение магнитов, при котором они сложены разноименными полюсами):

$$F = 2 \cdot \frac{M}{r^3} \left(1 - \frac{Q}{r^2} \right) \sin \alpha,$$

где M — магнитный момент каждого из магнитов;

r — расстояние между центром системы магнитов и центром магнитной стрелки.

Когда угол α равен 0° , то сила F равна нулю; максимальной величины сила F достигает при $\alpha = 90^\circ$.

Ориентировав определенным образом систему магнитов (назовем ее измерительной системой) относительно меридиана, можно направить силу F противоположно составляющей H напряженности магнитного поля Земли. Если затем поворачивать магниты, то при некоторой величине угла α сила F станет равна составляющей H и компенсирует последнюю. Величина силы F известна для любых значений угла α , в том числе и для угла, при котором достигается компенсация силы H . Поэтому, добившись равенства этих сил, мы определим величину горизонтальной составляющей H . На судне подобным же методом измеряются горизонтальные силы H' на любом компасном курсе.

Таким образом, действие дефлектора с равномерной шкалой основано на компенсации измеряемой силы H или H' силой F измерительной системы, как и у дефлектора Колонга.

Для того чтобы можно было определить момент компенсации сил, дефлектор снабжается вспомогательным магнитом, который должен располагаться под углом 90° к магнитной оси измерительной системы.

Ознакомимся с устройством прибора (рис. 43). Измерительные магниты 1 укреплены на шестернях 2 , которые одновременно приводятся во вращение вокруг вертикальной оси в противоположных направлениях с помощью системы шестерен $3, 4, 5$ и рукоятки 6 .

Верхний магнит имеет несколько больший магнитный момент по сравнению с нижним. Это необходимо для того, чтобы влияние на компасную стрелку как верхнего магнита, так и нижнего, расположенного

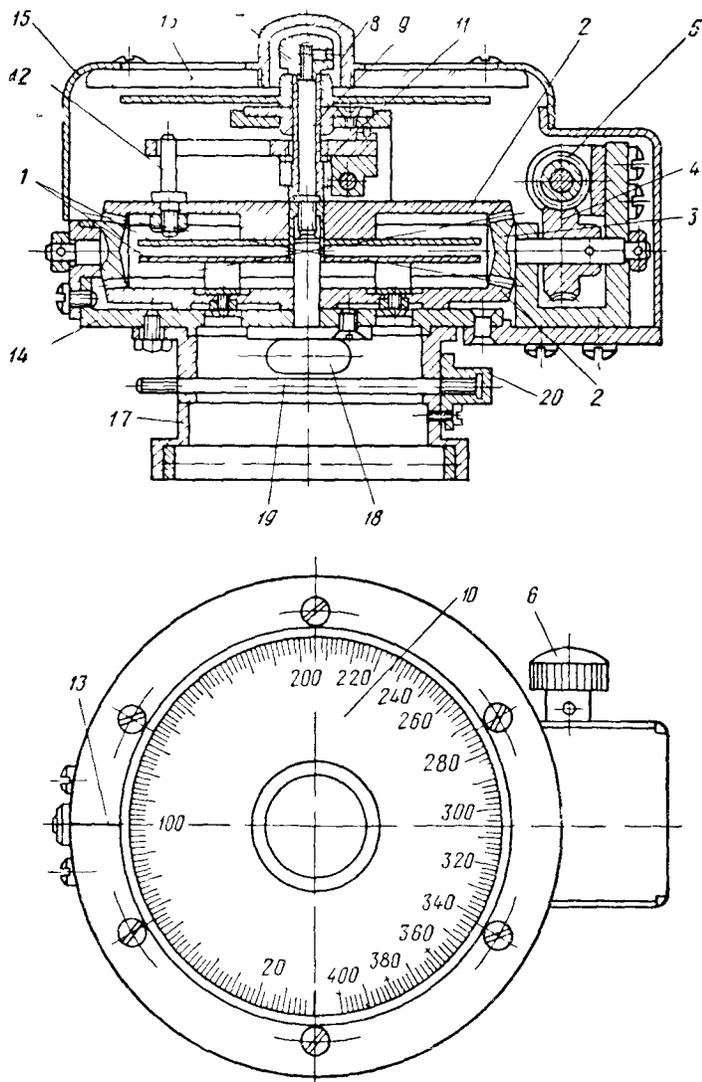


Рис 43

ближе к катушке, было одинаковым. Суммарный магнитный момент измерительной системы составляет около 500 ед. СГСМ. Однако по той или иной причине магнитные моменты магнитов могут изменяться. Поэтому в дефлекторе предусмотрено приспособление для переме-

щения одного из магнитов в вертикальном направлении. Поднимают или опускают магнит путем вращения в соответствующую сторону головки 7, закрываемой колпачком 8.

При вращении головки 6 одновременно с измерительными магнитами поворачивается вокруг оси 9 шкала 10, имеющая деления от 0 до 400 с ценой каждого деления, равной двум дефлекторным единицам.

Точность отсчета по шкале — одна дефлекторная единица. Хотя величина силы F , создаваемой измерительной системой дефлектора, изменяется пропорционально синусу угла α , шкала является равномерной, т. е. ее деления нанесены на одинаковых расстояниях одно от другого. Применение равномерной шкалы возможно потому,

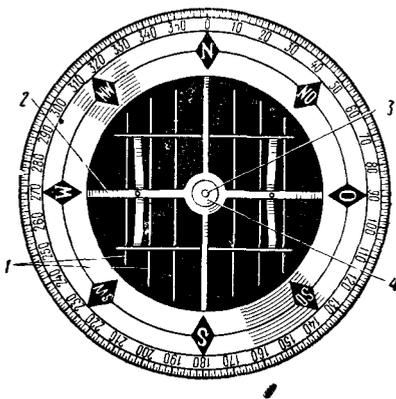


Рис 44

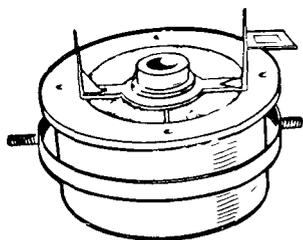


Рис 45

что непосредственно поворот диска со шкалой задается синусным механизмом 11, связанным с верхней шестерней 2 штифтом 12. Этот механизм заставляет шкалу по мере равномерного изменения угла α поворачиваться с различными скоростями. В результате при каждом новом значении угла α , т. е. при каждом новом положении измерительных магнитов, отсчет по шкале против неподвижного индекса 13 будет соответствовать величине силы F .

Измерительная система и диск со шкалой вместе с синусным механизмом смонтированы на плате 14 в корпусе 15. Верхняя часть корпуса закрыта стеклянной крышкой 16.

Для установки дефлектора на чашку пеленгатора служит цилиндрическое основание 17. В нем прорезано сквозное овальное отверстие 18 для наблюдения нити предметной мишени пеленгатора.

В гнездах основания 17 помещается вспомогательный магнит 19. Одно из гнезд имеет колпачок 20 с внутренней резьбой, куда ввинчивается конец вспомогательного магнита.

Достоинствами дефлектора являются его малый размер и главным образом равномерная шкала, позволяющая производить измерения на любом участке шкалы с одинаковой точностью. Дефлектор с равномерной шкалой не нуждается в подгонке к компасу по высоте. Это свойство дает возможность использовать прибор на компасах различных систем.

Измерения горизонтальных магнитных сил: составляющей H магнитного поля Земли, судовых сил H' , а также их проекций — производятся новым дефлектором по той же методике, как и дефлектором Колонга.

Картушка с малым магнитным моментом. При уничтожении четвертной девиации компаса используется предложенная В. Я. Павлиновым картушка с малым магнитным моментом. В отличие от обычной картушки ее магнитная система собрана из очень тонких стрелок. Их суммарный магнитный момент не превосходит 100—150 ед. СГСМ, т. е. он в 10—15 раз меньше магнитного момента картушки морского компаса КПМ. В результате этого магнитное поле стрелок картушки практически не производит индуктивного намагничивания брусков мягкого железа, устанавливаемых в нактоузе для уничтожения четвертной девиации, и ее показания свободны от девиации от индукции.

Сравнивая показания картушки Павлинова с показаниями обычной картушки компаса, можно определить величину девиации от индукции и принять меры к ее компенсации.

Картушка с малым магнитным моментом (рис. 44) имеет следующие основные части: магнитную систему 1, собранную из шести стрелок, алюминиевый каркас 2; агатовую топку 3, запрессованную в металлическую оправу 4; бумажный диск с градусной шкалой.

Магнитная система картушки Павлинова по длине и расположению стрелок идентична системе картушки 127 мм компаса, поэтому реакции обеих картушек на действие внешнего магнитного поля совершенно одинаковы.

Градусная шкала картушки обеспечивает взятие пеленгов с точностью до $0^\circ, 2'$.

На время наблюдений картушка с малым магнитным моментом помещается в специальный сухой котелок (рис. 45), снабженный пеленгатором.

Глава IV

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕВИАЦИИ И ВЫЧИСЛЕНИЕ ТАБЛИЦЫ ДЕВИАЦИИ

§ 15. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕВИАЦИИ

Общие сведения. Определение девиации магнитного компаса является важной составной частью общего комплекса девиационных работ. Знание точных величин девиации на каждый компасный (и магнитный) курс необходимо штурману для уверенного пользования компасом и ведения навигационной прокладки. Поэтому определение

девиации всегда надо выполнять самым тщательным образом, добиваясь наибольшей точности наблюдений.

Качество работы по определению девиации магнитного компаса во многом зависит от квалификации наблюдателя и соблюдения им практических рекомендаций, выработанных на основе многолетнего опыта специалистов-девиаторов и штурманов. Приведем важнейшие из этих рекомендаций и практических советов.

Перед определением девиации все судовые устройства должны быть закреплены по-походному. Если вблизи компаса расположены металлические устройства и предметы, положение которых во время рейса может изменяться (антенна радиолокатора, прожектор, стальная дверь и т. д.), об этом следует сделать специальную оговорку в таблице девиации, указав то положение названных устройств, в каком они находились во время определения девиации.

Прежде чем приступить к работе, девиатор или штурман должен убедиться в том, что в его одежде нет никаких металлических предметов, могущих оказать влияние на правильность показаний компаса.

Определение девиации следует выполнять на малых ходах судна, причем на каждом новом курсе можно приступать к наблюдениям лишь через 2—3 мин, необходимых для перематывания судового железа и успокоения картушки.

Работу по определению девиации по створам и пеленгам светил желательно выполнять вдвоем. При пеленговании створов помощник, наблюдая створы в бинокль, должен подавать сигнал о приходе судна на створную линию, а при пеленговании светил — замечать по часам моменты взятия пеленгов.

Определяя девиацию по створам, целесообразно заранее, еще до прихода судна на линию створа, навести пеленгатор на задний створный знак и удерживать его в таком положении до момента взятия пеленга, непрерывно наблюдая отсчет картушки под призмой.

Отсчеты пеленгов следует замечать по картушке с точностью до $0^{\circ},2$, причем перед взятием каждого пеленга необходимо проверить и уточнить курс судна.

На каждом курсе следует выполнять три — пять наблюдений с последующим осреднением результатов. Такого же правила нужно придерживаться и при сличении компасов.

Обычно девиация компаса определяется непосредственно после ее уничтожения с целью вычисления по результатам наблюдений таблицы остаточной девиации. Но в ряде случаев, например при существенном изменении судном магнитной широты, при плавании во льдах, перевозке металлических грузов, определение девиации выполняется независимо от ее уничтожения как вполне самостоятельная работа. В этих случаях наблюдения производятся с целью контроля и исправления табличных значений девиации.

Все основные, применяемые на практике способы определения девиации сводятся к сравнению наблюдаемых с помощью компаса величин компасного пеленга *КП(ОКП)* или компасного курса *КК* с из-

вестными значениями магнитного пеленга $МП$ ($ОМП$) или магнитного курса $МК$ соответственно:

$$\begin{aligned}\delta &= МП - КП; \\ \delta &= ОМП - ОКП; \\ \delta &= МК - КК.\end{aligned}\tag{61}$$

Определение девиации по пеленгам одного створа или отдаленного предмета. Пусть в пределах видимости находится створ, истинное направление $ИП$ которого указано на навигационной карте; требуется определить девиацию для какого-либо компасного курса.

В этом случае до начала наблюдений следует снять с карты величину $ИП$ створа, а также значение магнитного склонения d для данного района и вычислить магнитный пеленг $МП$ створа по формуле

$$МП = ИП - d.$$

Затем нужно лечь на требуемый компасный курс $КК$, руководствуясь показаниями компаса, и в момент пересечения створной линии взять компасный пеленг $КП$ створа. Тогда девиация определится как разность известного магнитного и наблюдаемого компасного пеленгов створа:

$$\delta = МП - КП.$$

Если требуется определить девиацию для другого курса, то нужно лечь по компасу на этот новый курс и, вновь взяв пеленг в момент пересечения створа, вычислить девиацию.

Так как по компасу фактически наблюдается не компасный пеленг $КП$, а обратная ему величина $ОКП$, то обычно девиация вычисляется по формуле

$$\delta = ОМП - ОКП.$$

Запись наблюдаемых величин и вычисления девиации производят по схеме, приведенной в табл. 2.

Изложенный способ определения девиации прост и для его выполнения требуется сравнительно немного времени. К недостаткам способа нужно отнести то, что наблюдатель не имеет возможности повторять наблюдения и контролировать величины взятых им компасных пеленгов. Следовательно, все ошибки пеленгования целиком войдут в наблюдаемую девиацию.

Случайная ошибка в определении девиации может возникнуть и вследствие отклонения судна от заданного курса. Но так как остаточная девиация компаса, т. е. девиация, наблюдаемая после уничтожения, не превосходит нескольких градусов и при перемене курса ее величина изменяется медленно, то эта ошибка при небольшом отклонении от курса не имеет практического значения.

Таблица 2

КК	ОМП	ОКП	δ
0°	48°,2	49°,6	-1°,4
45	48,2	48,9	-0,7
90	48,2	47,8	+0,4
	и т. д.		

Точность определения девиации зависит также от достоверности величин истинного пеленга и магнитного склонения.

Если в районе, где производится определение девиации, нет нанесенных на карту створов, то необходимо определить магнитный пеленг створа каких-либо приметных возвышенностей, мысов, зданий и т. п. С этой целью следует взять компасные пеленги естественного створа на восьми главных и четвертных компасных курсах, а затем вычислить среднее арифметическое из наблюдаемых *КП*. Эта величина будет приближенно равна магнитному пеленгу створа. Действительно, значения компасных пеленгов для восьми указанных курсов можно представить в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} КП_N = МП - \delta_N; \\ КП_{NE} = МП - \delta_{NE}; \\ \dots \dots \dots \\ КП_{NW} = МП - \delta_{NW}. \end{array} \right.$$

При вычислении среднего значения *КП* величины $\delta_N, \delta_{NE}, \delta_E, \dots, \delta_{NW}$ сократятся, так как каждая из них является суммой периодических функций — полукруговой и четвертной девиаций, имеющих соответственно на обратных и взаимно перпендикулярных курсах разные знаки при одинаковом абсолютном значении. Поэтому

$$\frac{\sum_1^8 КП}{8} \approx МП. \quad (62)$$

Полученное равенство является приближенным, так как, кроме полукруговой и четвертной девиаций, в выражения δ_N, δ_{NE} и т. д. входит величина постоянной девиации *A*.

С учетом величины *A* будем иметь

$$\frac{\sum_1^8 КП}{8} = МП - A. \quad (63)$$

Строгий математический вывод формул (62) и (63) учащийся может выполнить, пользуясь формулой (68), приведенной на стр. 99.

Во многих случаях постоянная девиация *A* имеет малую величину, поэтому *МП* достаточно вычислить по приближенной формуле (62). Если же коэффициент *A* велик, то его необходимо принять во внимание, выбрав эту величину из предыдущей таблицы остаточной девиации.

Поступая таким образом, следует иметь в виду, что коэффициент *A* включает в себя собственно постоянную девиацию и инструментальную ошибку — в основном погрешность установки призмы пеленгатора. Последняя у разных экземпляров пеленгаторов имеет различную величину и иногда достигает больших значений. Поэтому, желая полу-

чить надежную величину магнитного пеленга (с учетом коэффициента A), необходимо производить наблюдения тем пеленгатором, который использовался при определении пеленгов для составления последней таблицы остаточной девиации.

Все сказанное выше полностью относится и к определению девиации по пеленгам отдаленного предмета. Но, пользуясь вместо створа отдаленным предметом, следует учитывать то обстоятельство, что магнитный пеленг предмета изменяется при перемещении судна.

Из рис. 46 видно, что изменение величины пеленга зависит от радиуса r окружности, внутри которой маневрирует судно, и расстояния D до пеленгуемого предмета. Проведем из точки P , где находится предмет, касательную к окружности и обозначим угол между прямыми OP и KP через Δ . Тогда из прямоугольного треугольника PKO получим

$$r = D \sin \Delta,$$

откуда

$$D = \frac{r}{\Delta^\circ \operatorname{arc} 1^\circ} = \frac{57,3 r}{\Delta^\circ}. \quad (64)$$

Величина Δ , характеризующая изменение магнитного пеленга, не должна превышать $0^\circ,2$.

Зная r , легко найти то минимальное расстояние D , при котором точность определения девиации будет лежать в указанных пределах ($0^\circ,2$).

Решив несколько примеров на вычисление расстояния D по известным r и Δ , можно убедиться в том, что для точного определения девиации необходимо пеленговать предметы, находящиеся на расстоянии в 10 и более миль.

Так, при $r = 1$ кбт и $\Delta = 0^\circ,2$ получим:

$$D = \frac{57,3 \cdot 1}{0,2} = 286,5 \text{ кбт} = 28,6 \text{ мили.}$$

Наблюдать столь удаленные предметы удастся только в исключительных случаях. Поэтому на практике часто приходится использовать более близкие к судну предметы.

Следовательно, рассматриваемый способ применим в основном на судах малого тоннажа, а также в тех случаях, когда судно стоит на бочке и разворачивается с помощью буксира. При работе на крупнотоннажных судах следует определять девиацию другими способами. Если же это по каким-либо причинам невозможно, то перед началом наблюдений рекомендуется установить в месте определения девиации буюк и на каждом курсе пеленговать предмет в тот момент, когда судно будет

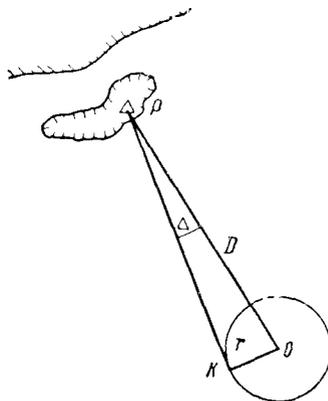


Рис. 46

проходить рядом с буйком. Такая мера несколько повысит надежность определения девиации, если только буюк не будет сноситься под действием течения и ветра.

Определение девиации по вееру створов. В некоторых портах для облегчения девиационных работ, повышения их точности и сокращения времени на их выполнение оборудованы системы створных знаков, называемые веером створов.

Хорошим примером веера створа являются кронштадтские девиационные створы, которые оборудованы в прошлом столетии по инициативе И. П. Белавенца. Они имеют общий для всех створов задний знак — трубу одного из заводов. Роль передних знаков выполняют оцифрованные марки, нанесенные краской на стенках гавани.

Цифры на марках указывают истинные направления (*ОИП*) створных знаков. Сеть этих линий настолько густа, что на каждом курсе в течение короткого промежутка времени наблюдатель может взять пеленги трех — пяти створов.

Определение девиации по вееру створов производят в следующем порядке: приводят судно на требуемый курс и, следуя малым ходом, берут отсчет компасного пеленга (*ОКП*) пересекаемой створной линии; записывают величину *ОКП* и *ОИП* данной линии; далее, не меняя курса, повторяют работу при пересечении следующих двух — четырех створных линий, фиксируя в каждом случае *ОКП* и соответствующее значение *ОИП*; переводят величины *ОИП* в *ОМП* путем вычитания склонения d для данного района и вычисляют девиацию из каждого отдельного наблюдения по формуле

$$\delta = \text{ОМП} - \text{ОКП}.$$

За точное значение девиации принимают среднее арифметическое из трех — пяти девиаций, наблюденных на данном курсе. Так же определяют девиацию и на других курсах.

В табл. 3 приводится пример записи результатов наблюдений и вычисления девиации.

Таблица 3

КК	ОИП	d	ОМП	ОКП	δ	$\delta_{\text{ср}}$
0°	170°,2 170,8 171,5 172,0 172,4	-6°,2	176°,4 177,0 177,7 178,2 178,6	177°,1 178,0 178,5 179,0 179,5	-0°,7 -1,0 -0,8 -0,8 -0,9	-0°,8
и т д						

Как мы видим, данный способ почти ничем не отличается от определения девиации по пеленгам одного створа или отдаленного предмета. Но точность его значительно выше благодаря тому, что на каждом

курсе производится многократное определение девиации с последующим ее осреднением, уменьшающим влияние случайных ошибок пеленгования. Когда одна из наблюдаемых девиаций вследствие грубой ошибки в отсчете резко отличается от остальных девиаций на данном курсе, наблюдатель может отбросить ее и произвести для контроля дополнительное пеленгование следующих створных линий.

Определение девиации по показаниям гирокомпаса. При наличии на судне гирокомпаса девиация может быть определена путем сличения показаний магнитного и гироскопических компасов.

Обозначим курс, отсчитываемый по гирокомпасу, KK_{Γ} ; поправку гирокомпаса Δ_{Γ} ; курс, отсчитываемый по магнитному компасу KK_{M} ; поправку магнитного компаса Δ_{M} .

Для любого истинного курса судна справедливы следующие зависимости:

$$IK = KK_{\Gamma} + \Delta_{\Gamma}; \quad IK = KK_{\text{M}} + \Delta_{\text{M}},$$

откуда

$$\Delta_{\text{M}} = KK_{\Gamma} + \Delta_{\Gamma} - KK_{\text{M}}.$$

Таким образом, зная KK_{Γ} , Δ_{Γ} и KK_{M} , можно вычислить общую поправку магнитного компаса Δ_{M} , а вычтя из нее величину склонения d , получить значение δ :

$$\delta = KK_{\Gamma} + (\Delta_{\Gamma} - d) - KK_{\text{M}}. \quad (65)$$

Практически определение девиации по сличению с гирокомпасом выполняют следующим образом:

приводят судно на компасный курс KK_{M} по показаниям магнитного компаса;

по прошествии 2—3 мин замечают одновременно курс KK_{M} и курс по гирокомпасу KK_{Γ} , т. е. производят сличение;

вычисляют девиацию по формуле (65).

Полученная девиация соответствует тому компасному курсу KK_{M} , на котором производилось сличение.

Производя сличение, целесообразно отсчитывать курс по гирокомпасу не один, а три — пять раз и в расчетную формулу вводить среднее значение KK_{Γ} .

Точность определения девиации рассматриваемым способом зависит от стабильности поправки гирокомпаса. Практика работы с гирокомпасом показывает, что его поправка не является постоянной, а изменяется при маневрировании судна в зависимости от скорости и величины угла поворота. При определенном сочетании этих элементов маневрирования возможны весьма значительные изменения поправки гирокомпаса. Чтобы свести эти изменения к минимуму и тем самым повысить точность определения девиации, необходимо работать на малых ходах и избегать поворотов на большое число градусов.

Схема записи результатов сличений и вычисления девиации при работе данным способом приводится в табл. 4.

KK_M	$KK_{ГСП}$	$\Delta_r - d$	$MK = KK_r + (\Delta_r - d)$	δ
0° 45	1°,4 46,8	-0°,9 -0,9	0°,5 45,9 и т. д.	+0°,5 +0,9

Определение девиации по сравнению с главным магнитным компасом. Девиация путевого компаса не может быть определена из наблюдений береговых ориентиров, так как большая часть горизонта обычно бывает закрыта стенками рубки. Поэтому девиацию такого компаса выявляют, сличая его показания с показаниями главного компаса. В основу данного способа положена следующая зависимость:

$$KK_{ГП} + \delta_{ГП} = KK_{П} + \delta_{П},$$

где $KK_{ГП}$ и $KK_{П}$ — компасные курсы, отсчитываемые по главному и путевому компасам;

$\delta_{ГП}$ и $\delta_{П}$ — девиации главного и путевого компасов.

Приведенная формула является тождеством, так как ее правая и левая части представляют собой величину магнитного курса. Переписав ее в виде

$$\delta_{П} = KK_{ГП} - KK_{П} + \delta_{ГП}, \quad (66)$$

получаем рабочую формулу для определения девиации путевых компасов.

Практическая часть работы, запись результатов наблюдений и вычисления выполняются так же, как и в предыдущем способе.

Определение девиации по взаимным пеленгам. Наиболее естественный способ определения девиации — это одновременное взаимное пеленгование, производимое с двух магнитных компасов, один из которых установлен на судне, а второй находится на берегу или на деревянной шлюпке. Направления, наблюдаемые по судовому компасу, представляют собой компасные пеленги ($OKП$), в то время как пеленги, взятые по компасу на берегу или шлюпке, являются магнитными. Разность этих величин дает значение девиации для того компасного курса, на котором лежало судно в момент взаимного пеленгования.

Этот способ позволяет на каждом курсе сделать несколько определений девиации и получить ее среднее значение с меньшим влиянием случайных ошибок.

При взаимном пеленговании совершенно безразлично, в каком положении относительно шлюпки или берегового компаса находится судно. Важно только, чтобы оно точно удерживалось на заданном курсе и пеленги с обоих компасов фиксировались одновременно по подаваемому с судна условному сигналу. Во избежание ошибок

в записи результатов наблюдений пеленги, отсчитываемые на обоих компасах в один и тот же момент времени, целесообразно обозначать одинаковыми порядковыми номерами.

Несмотря на ряд положительных качеств, способ взаимных пеленгов в настоящее время редко применяется в девиационной практике. Это объясняется известными трудностями, связанными с перевозкой и установкой компасного котелка и треноги на берегу или шлюпке, и необходимостью сигнализации в момент взятия пеленгов. Кроме того, широкому применению этого способа препятствует то, что при пеленговании берегового компаса судно должно находиться вблизи берега, иначе компас не будет виден. Маневрирование же у берега возможно только при достаточно больших глубинах. В тех случаях, когда второй компас установлен на шлюпке, выполнению способа взаимных пеленгов могут помешать волнение и ветер.

Определение девиации по пеленгам небесных светил. В открытом море девиация магнитного компаса определяется путем пеленгования небесных светил.

В этом случае девиацию находят по формуле

$$\delta = (ИП - d) - КП.$$

Величину компасного пеленга светила наблюдают с помощью компаса, склонение d снимают с карты, а истинный пеленг (азимут) светила выбирают из таблиц азимутов или истинных пеленгов светил или находят по номограммам.

Поскольку азимуты светил изменяются с течением времени, то при работе данным способом необходимо на каждом курсе сделать три — пять определений девиации и затем вычислить ее среднее значение.

Практически наблюдения и вычисления удобно выполнять в таком порядке:

- 1) лечь на нужный компасный курс;
- 2) взять три — пять компасных пеленгов (ОКП) светила, замечая момент взятия каждого пеленга по часам; при этом пеленги желательно наблюдать примерно через равные промежутки времени;
- 3) выбрать из таблиц значения истинных азимутов светила на замеченные в п. 2 моменты времени и, вычтя величину склонения d , найти магнитные пеленги светила;
- 4) сопоставляя величины ОКП с соответствующими значениями ОМП, определить девиацию для каждого из трех — пяти наблюде-

Т а б л и ц а 5

КК	Моменты времени	ИП(А)	d	ОМП	ОКП	δ	$\delta_{ср}$
0°	7 ч 20 мин	270°,8	+4°,2	266°,6	265°,1	+1°,5	+1°,5
	7 21	270,6		266,4	265,0	+1,4	
	7 22	270,5		266,3	264,7	+1,6	
45 и т. д.							

ний и вычислить среднее значение девиации для данного компасного курса.

Схема записи наблюдений и вычислений приведена в табл. 5.

Можно также применить другой метод обработки наблюдений; усреднить все взятые на данном курсе *ОКП* и замеченные по часам моменты времени; по среднему моменту выбрать из таблиц величину истинного пеленга (азимута) светила и, вычтя величину склонения d , получить магнитный пеленг (*ОМП*) светила; по разности *ОМП* и среднего значения *ОКП* определить девиацию на данный курс.

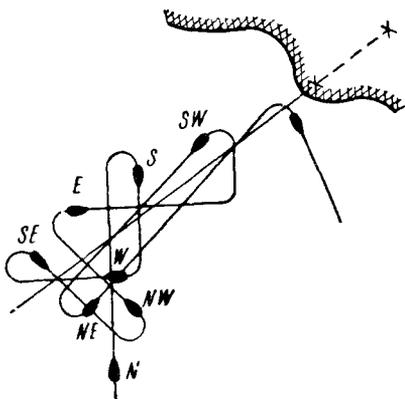


Рис 47

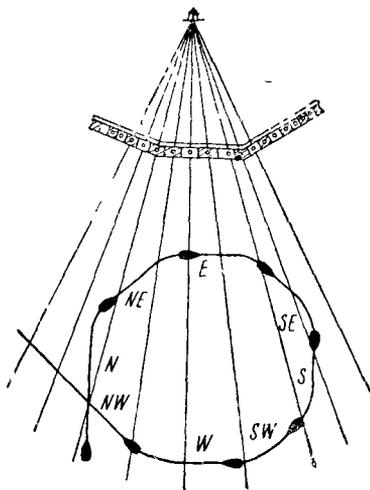


Рис 48

Рассмотренный способ широко используется в практике судовождения. В подавляющем большинстве случаев он применяется для получения поправки магнитного компаса с целью контроля табличных значений девиации. Но с таким же успехом он может быть применен и для составления новой таблицы, если девиация компаса изменилась во время рейса.

Более детальное описание определения поправки компаса, в частности правила пользования астрономическими таблицами и номограммами для нахождения истинного азимута светил, приводится в курсе мореходной астрономии.

При определении девиации тем или иным способом важное значение для экономии времени имеет очередность курсов, на которых производятся наблюдения. Перед началом работы необходимо, руководствуясь расположением створов (предметов), величиной «мертвого угла» компаса и глубинами в районе работы, установить последовательность курсов, стремясь свести к минимуму «холостые» галсы и число маневров судна.

Один из возможных вариантов маневрирования при определении девиации по пеленгам одного створа показан на рис. 47. Рациональная

последовательность курсов при работе на веере створов иллюстрируется рис. 48.

Девияция компаса может быть определена не только путем пленгования предметов (светил) или по сличению, но и другими методами. К ним относятся: определение девияции с помощью секундомера во время циркуляции судна, определение девияции по результатам измерений дефлектором магнитных сил на различных курсах и т. д. Однако эти способы по причине их сложности и малой точности в настоящее время не применяются в девияционной практике.

§ 16. ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ И СОСТАВЛЕНИЕ ТАБЛИЦЫ ДЕВИАЦИИ

Ни один из применяемых на практике способов уничтожения девияции магнитного компаса не дает абсолютно точных результатов. Это означает, что даже после самого тщательного уничтожения у компаса неизбежно будет наблюдаться остаточная девияция. Правда, величина ее обычно мала и не превышает 2—4°. Но тем не менее ее необходимо учитывать при управлении судном и при определении его места с помощью компаса.

Остаточная девияция (а также величины коэффициентов девияции, значения составляющих H и Z земного магнетизма, положение магнитов-уничтожителей и характеристика мягкого железа компаса) фиксируется в официальном документе «Таблица девияции» (табл. 6), которую составляет и подписывает девиатор или капитан судна.

Эта таблица должна обеспечивать простую и быструю выборку величины девияции на любой компасный и магнитный курс. Для выполнения этого требования в нее заносят значения девияции для 24 или 36 равноотстоящих компасных курсов, т. е. на курсы через 15 или 10°. При таком устройстве таблицы выборку девияции на любой промежуточный курс судоводитель может произвести с достаточной точностью путем простой линейной интерполяции (при условии, что остаточная девияция компаса невелика).

Казалось бы, что наиболее естественным способом составления таблицы является запись в нее результатов наблюдений девияции на 24 или 36 компасных курсах. Однако определение девияции на столь большом числе курсов требует затраты нескольких часов эксплуатационного времени, особенно при работе на крупнотоннажных судах. Наряду с этим составленная подобным образом таблица может содержать ошибочные значения остаточной девияции вследствие влияния случайных ошибок. Поэтому такой способ является нецелесообразным и фактически никогда не применяется.

Принятый на практике метод составления таблицы разделяется на три этапа: первый — это определение остаточной девияции компаса на небольшом числе равноотстоящих курсов; второй — вычисление коэффициентов девияции по ее наблюдаемым значениям; третий — вычисление девияции на любое число курсов по известным коэффициентам.

Таблица девиации теплохода «Архангельск»,
определенной 9 ноября 1969 г. на Восточном Кронштадтском рейде

Компас главный К П М № 3013 Компас путевой К П М № 2147

КК	Девиация	КК	Девиация	КК	Девиация	КК	Девиация
N 0°	-0°,6	S 180°	+1°,0	N 0°	-0°,7	S 180°	-0°,1
15	-0,7	195	+0,9	15	-0,6	195	+0,4
30	-0,7	210	+0,8	30	-0,4	210	+0,9
NE 45	-0,6	SW 225	+0,6	NE 45	-0,3	SW 225	+1,3
60	-0,5	240	+0,5	60	-0,2	240	+1,5
75	-0,2	255	+0,4	75	-0,2	255	+1,4
E 90	+0,1	W 270	+0,3	E 90	-0,4	W 270	+1,2
105	+0,4	285	+0,2	105	-0,6	285	+0,8
120	+0,6	300	+0,1	120	-0,8	300	+0,3
SE 135	+0,9	NW 315	-0,1	SE 135	-0,9	NW 315	-0,1
150	+1,1	330	-0,3	150	-0,8	330	-0,5
165	+1,0	345	0,4	165	-0,5	345	-0,7
S 180	+1,0	N 360	-0,6	S 180	-0,1	N 360	-0,7

Коэффициенты

$A = +0°,2$	$B = -0°,1$	$A = 0°,0$	$B = -0°,8$
$D = -0,2$	$C = -0,8$	$D = +0,5$	$C = -0,3$
$E = -0,0$		$E = -0,4$	
$H = 112$ д. е.	$Z = 385$ д. е.	$H = 116$ д. е.	$Z = 371$ д. е.

Магниты

Прод. N в корму 2—C ₂₀	F 135	N в корму 1—O ₂₀ ; 1—C ₂₀	F 150
Попер. N в пр/б 1—T ₁₅	450	N в пр/б 2—T ₁₅	385
Верг. N вверх 1—K ₃₀	1,4	N вверх 1—K ₃₀	2,15

Мягкое железо

Внутреннее 2 прод. бруска Ø 22 мм	2 продольных бруска Ø 22 мм
Индукц. пласт. 2 поперечные пластины l = 13 см	2 поперечные пластины l = 13 см
Наружное нет	нет

Замечания. Стрелы по-походному; на палубе тяжеловесы
9 ноября 1969 г.

Примечание. При заполнении бланка таблицы девиации применяют следующие обозначения:

- O_{20} — магнит обыкновенный длиной 20 см;
- C_{15} — магнит средний длиной 15 см;
- T_{10} — магнит тонкий длиной 10 см;
- K_{30} — магнит креновой длиной 30 см;
- $пр/б$ — правый борт;
- $л/б$ — левый борт;
- F — отсчет каретки с магнитами по шкале девиационного прибора;
-  — концы индукционных пластин не загнуты;
-  — концы индукционных пластин загнуты вверх;
-  — концы индукционных пластин загнуты вниз;
-  — диаметр брусков мягкого железа.

Такой метод составления таблицы сокращает время, затрачиваемое на девиационные работы, так как определение девиации производится на малом числе курсов. Основное его достоинство заключается в том, что в процессе вычисления коэффициентов случайные ошибки наблюдений, за исключением грубых промахов, сводятся к минимуму, благодаря чему табличные значения девиации можно считать практически вполне надежными. Указанный метод позволяет также контролировать результаты определения девиации и тем самым повышает ответственность лиц, выполняющих работу, за качество наблюдений.

Рассмотрим вопрос о том, на каких компасных курсах следует производить определение остаточной девиации для составления таблицы. Измерение любой физической величины всегда нужно стремиться выполнять при таких условиях, при которых она проявляет себя максимальным образом. Это полностью относится и к определению девиации. Известно, что величина девиации изменяется в связи с изменением курса. Полукруговая девиация имеет наибольшую величину на главных компасных курсах, а четвертная — на четвертных и главных. Следовательно, чтобы наблюдать девиации в их максимальном значении, необходимо выполнять определения на восьми главных и четвертных компасных курсах, т. е. на курсах $0, 45, 90, \dots, 315^\circ$.

Другим требованием, от которого зависит выбор курсов при определении девиации, является простота вычислительной работы по составлению таблицы девиации. В дальнейшем мы увидим, что этому требованию полностью удовлетворяют те же равноотстоящие главные и четвертные компасные курсы.

Наконец, наблюдать девиацию на указанных курсах важно еще и потому, что эти курсы содержатся в таблице девиации. Сравнивая результаты определений с вычисленными табличными значениями на одноименных курсах, можно контролировать качество наблюдений девиации и в случае выявления ошибок повторить наблюдения или исправить ошибки вычислений.

Итак, наблюдение остаточной девиации для составления таблицы следует производить на восьми главных и четвертных компасных курсах. Способы определения девиации изложены в предыдущем параграфе. Поэтому здесь мы рассмотрим только последующие этапы составления таблицы девиации.

Вычисление коэффициентов по девиациям, наблюдаемым на восьми главных и четвертных курсах. В главе III была выведена формула (32), показывающая зависимость между величиной синуса девиации, точными коэффициентами девиации A' , B' , C' , D' и E' и компасными курсами:

$$\sin \delta = A' \cos \delta + B' \sin k' + C' \cos k' + D' \sin (2k' + \delta) + E' \cos (2k' + \delta).$$

Эта формула справедлива для любых значений девиации. Однако применять ее для вычисления коэффициентов по девиациям, наблюдаемым на равноотстоящих курсах, нецелесообразно, поскольку эта работа потребует громоздких расчетов. Поэтому в тех случаях, когда девиация компаса невелика, коэффициенты нужно вычислять по более простой формуле, которая выводится из предыдущей.

Для вывода упрощенной формулы воспользуемся следующими тригонометрическими зависимостями:

$$\begin{aligned} \sin (\alpha + \beta) &= \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta, \\ \cos (\alpha + \beta) &= \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta \end{aligned}$$

и перепишем выражение для $\sin \delta$ в таком виде:

$$\begin{aligned} \sin \delta &= A' \cos \delta + B' \sin k' + C' \cos k' + D' \sin 2k' \cos \delta + \\ &+ D' \cos 2k' \sin \delta + E' \cos 2k' \cos \delta - E' \sin 2k' \sin \delta. \end{aligned}$$

С точностью до величин первого порядка малости

$$\sin \delta = \delta \text{ и } \cos \delta = 1.$$

Поэтому предыдущую формулу можно записать так:

$$\begin{aligned} \delta &= A' + B' \sin k' + C' \cos k' + D' \sin 2k' + \\ &+ D' \delta \cos 2k' + E' \cos 2k' - E' \delta \sin 2k'. \end{aligned}$$

Отбросив слагаемые $D' \delta \cos 2k'$ и $-E' \delta \sin 2k'$ как величины второго порядка малости, получим

$$\delta = A' + B' \sin k' + C' \cos k' + D \sin 2k' + E' \cos 2k'. \quad (67)$$

Но и в таком виде формула еще не вполне удобна для вычисления коэффициентов, так как в нее входят величины точных коэффициентов девиации, которые, как это было показано в § 10, являются функциями тангенса или синуса наибольшей девиации, производимой той или иной силой:

$$A' = \operatorname{tg} A, \quad B' = \sin B, \quad C' = \sin C, \quad D' = \sin D, \quad E' = \sin E,$$

где

A — постоянная девиация;
 B, C, D и E — максимальные девиации от сил $B' \lambda H, C' \lambda H, D' \lambda H$ и $E' \lambda H$.

Для дальнейшего упрощения формулы еще раз воспользуемся тем, что синус и тангенс малого угла численно равны самому углу, выраженному в радианах, т. е. примем

$$A' = A, \quad B' = B, \quad C' = C, \quad D' = D, \quad E' = E.$$

Заменяв в формуле (67) точные коэффициенты величинами максимальных девиаций A, B, C, D и E , получим

$$\delta = A + B \sin k' + C \cos k' + D \sin 2k' + E \cos 2k'. \quad (68)$$

Заметим, что величины δ, A, B, C, D и E здесь представлены в радианной мере. Для практических же целей удобнее выражать их в градусах. Этого легко достичь, если разделить обе части уравнения на $\text{arc } 1^\circ$, или, что то же самое, умножить на $57,3$. Вид формулы при этом не изменится. Величины A, B, C, D и E именуются приближенными коэффициентами девиации, так как сама формула (68) является приближенной, представляя собой сумму первых пяти членов разложения в ряд синуса девиации. Эта формула и служит основой для вычисления коэффициентов по наблюдаемым девиациям.

Подставляя в формулу (68) величины девиаций, наблюдаемых на главных и четвертных компасных курсах, а также значения самих курсов в градусах, получим уравнения:

$$\begin{aligned} \delta_N &= A + C + E; \\ \delta_{NE} &= A + B \sin 45^\circ + C \cos 45^\circ + D; \\ \delta_E &= A + B - E; \\ \delta_{SE} &= A + B \sin 135^\circ + C \cos 135^\circ - D; \\ \delta_S &= A - C + E; \\ \delta_{SW} &= A + B \sin 225^\circ + C \cos 225^\circ + D; \\ \delta_W &= A - B - E; \\ \delta_{NW} &= A + B \sin 315^\circ + C \cos 315^\circ - D. \end{aligned}$$

Учитывая знаки тригонометрических функций, а также то, что абсолютные значения синусов и косинусов углов, кратных 45° , одинаковы, можем написать:

$$\begin{aligned} \delta_N &= A + C + E; \\ \delta_{NE} &= A + B \cdot S_4 + C \cdot S_4 + D; \\ \delta_E &= A + B - E; \\ \delta_{SE} &= A + B \cdot S_4 - C \cdot S_4 - D; \\ \delta_S &= A - C + E; \\ \delta_{SW} &= A - B \cdot S_4 - C \cdot S_4 + D; \\ \delta_W &= A - B - E; \\ \delta_{NW} &= A - B \cdot S_4 + C \cdot S_4 - D, \end{aligned} \quad (69)$$

где через S_4 обозначены $\sin 45^\circ$ и $\cos 45^\circ$.

Мы получили восемь уравнений с пятью неизвестными A, B, C, D и E . Число уравнений превосходит число неизвестных. Для вычисления пяти коэффициентов из уравнений (69) применяется способ наименьших квадратов. Не излагая здесь самого способа, укажем, что он позволяет преобразовать исходные уравнения в так называемые нормальные уравнения, количество которых всегда будет равно числу искомых коэффициентов. Нормальные уравнения решаются

обычными алгебраическими способами и обеспечивают вычисление вероятнейших, т. е. весьма близких к действительным, значений коэффициентов девиации.

Для получения нормального уравнения каждое из исходных уравнений надо умножить на множитель при определяемом неизвестном (коэффициенте), а затем все произведения сложить.

Выведем нормальные уравнения и расчетные формулы для вычисления коэффициентов девиации A , B , C , D и E .

Умножая каждое из уравнений (69) на множитель при коэффициенте A (множитель равен единице) и складывая, получим первое нормальное уравнение

$$\sum_1^8 \delta = 8A.$$

Из него найдем формулу для вычисления коэффициента A по известным девиациям:

$$A = \frac{\sum_1^8 \delta}{8}. \quad (70)$$

В развернутом виде формулу коэффициента A записывают так:

$$A = \frac{\frac{\delta_N + \delta_S}{2} + \frac{\delta_E + \delta_W}{2} + \frac{\delta_{NE} + \delta_{SW}}{2} + \frac{\delta_{SE} + \delta_{NW}}{2}}{2}. \quad (71)$$

Чтобы получить расчетную формулу коэффициента D , умножим каждое из исходных уравнений на множитель при указанном коэффициенте. В первом, третьем, пятом и седьмом уравнениях этот множитель равен нулю, а в остальных — единице с соответствующим знаком.

После умножения получим:

$$\begin{aligned} \delta_{NE} &= A + B \cdot S_4 + C \cdot S_4 + D; \\ \delta_{SW} &= A - B \cdot S_4 - C \cdot S_4 + D; \\ -\delta_{SE} &= -A - B \cdot S_4 + C \cdot S_4 + D; \\ -\delta_{NW} &= -A + B \cdot S_4 - C \cdot S_4 + D. \end{aligned}$$

Отсюда получаем второе нормальное уравнение

$$(\delta_{NE} + \delta_{SW}) - (\delta_{SE} + \delta_{NW}) = 4D,$$

откуда

$$D = \frac{\frac{\delta_{NE} + \delta_{SW}}{2} - \frac{\delta_{SE} + \delta_{NW}}{2}}{2}. \quad (72)$$

В сокращенном виде формулу коэффициента D записывают так:

$$D = \frac{\Sigma(\delta \cdot \sin 2k')}{4}. \quad (73)$$

Нормальное уравнение для вычисления коэффициента E найдем, умножив первое, третье, пятое и седьмое уравнения на множитель при этом коэффициенте и сложив произведения:

$$\begin{aligned} \delta_N &= A + C + E \\ \delta_S &= A - C + E \\ -\delta_E &= -A - B + E \\ \underline{-\delta_W} &= \underline{-A + B + E} \\ (\delta_N + \delta_S) - (\delta_E + \delta_W) &= 4E. \end{aligned}$$

Решив это нормальное уравнение относительно E , получим

$$E = \frac{\frac{\delta_N + \delta_S}{2} - \frac{\delta_E + \delta_W}{2}}{2} \quad (74)$$

или в сокращенной записи

$$E = \frac{\Sigma(\delta \cdot \cos 2k')}{4}. \quad (75)$$

Остается вывести формулы для вычисления коэффициентов B и C . Умножим третье и седьмое исходные уравнения на 1 и -1 , первое и пятое на 0, а остальные на $\sin 45^\circ$ с соответствующим знаком. Тогда получим:

$$\begin{aligned} \delta_E &= A + B - E; \\ -\delta_W &= -A + B + E; \\ \delta_{NE} \cdot S_4 &= A \cdot S_4 + B \cdot S_4^2 + C \cdot S_4^2 + D \cdot S_4; \\ -\delta_{SW} \cdot S_4 &= -A \cdot S_4 + B \cdot S_4^2 + C \cdot S_4^2 - D \cdot S_4; \\ \delta_{NE} \cdot S_4 &= A \cdot S_4 + B \cdot S_4^2 - C \cdot S_4^2 - D \cdot S_4; \\ -\delta_{NW} \cdot S_4 &= -A \cdot S_4 + B \cdot S_4^2 - C \cdot S_4^2 + D \cdot S_4. \end{aligned}$$

Сложим получившиеся выражения:

$$(\delta_E - \delta_W) + (\delta_{NE} - \delta_{SW}) \cdot S_4 + (\delta_{SE} - \delta_{NW}) \cdot S_4 = 2B + 4B \cdot S_4^2.$$

Но

$$\sin^2 45^\circ = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 = \frac{1}{2},$$

следовательно, нормальное уравнение имеет вид

$$(\delta_E - \delta_W) + (\delta_{NE} - \delta_{SW}) \cdot S_4 + (\delta_{SE} - \delta_{NW}) \cdot S_4 = 4B.$$

Таблица 7

КК	I	КК	II	III	IV	К	V	К	VI	VII	VIII	IX	X	
	δ		δ	$\frac{1}{2} (I+II)$	$\frac{1}{2} (I-II)$		$K \cdot IV$		$K \cdot IV$	Верхняя половина ст. III	Нижняя половина ст. III	$\frac{1}{2} (VII++VIII)$	$\frac{1}{2} (VII-- VIII)$	
N	-0°,3	S	+0°,2	-0,05	-0,25	0	0	1	-0,25	-0,05	-0,30	-0,18	+0°,12	= E
NE	-0,8	SW	+0,7	-0,05	-0,75	S ₄₅	-0,52	S ₄₅	-0,52	-0,05	-0,35	-0,20	+0°,15	= D
E	-0,8	W	+0,2	-0,30	-0,50	1	-0,50	0	0	$\Sigma =$		-0°,38		
SE	-0,3	NW	-0,4	-0,35	+0,05	S ₄₅	+0,04	-S ₄₅	-0,04	$\frac{1}{2} \Sigma =$		-0°,19	= A	
Контроль III+IV=I							+	0,04	+	-	Контроль X + IX = VII			
							-	1,02	-	0,81				
						B =	Σ	-0,98	Σ	-0,81				
							$\frac{1}{2} \Sigma$	-0°,49	$\frac{1}{2} \Sigma$	0°,40				

Решая его относительно B , получим

$$B = \frac{\frac{\delta_E - \delta_W}{2} + \frac{\delta_{NE} - \delta_{SW}}{2} \cdot S_4 + \frac{\delta_{SE} - \delta_{NW}}{2} \cdot S_4}{2} \quad (76)$$

или

$$B = \frac{\sum(\delta \cdot \sin k')}{4}. \quad (77)$$

Аналогичным образом выводится и расчетная формула коэффициента C . Она имеет вид

$$C = \frac{\frac{\delta_N - \delta_S}{2} + \frac{\delta_{NE} - \delta_{SW}}{2} \cdot S_4 + \frac{\delta_{SE} - \delta_{NW}}{2} \cdot (-S_4)}{2} \quad (78)$$

или

$$C = \frac{\sum(\delta \cdot \cos k')}{4}. \quad (79)$$

На основе формул 71, 72, 74, 76 и 78 составлена схема (табл. 7) для вычисления коэффициентов A , B , C , D и E по девиациям, наблюдаемым на восьми главных и четвертных компасных курсах.

Такая схема применяется на отечественном флоте. Она значительно сокращает время, затрачиваемое на вычисления коэффициентов девиации, так как в ней учтено, что расчетные формулы имеют одинаковые элементы $\left(\frac{\delta_N + \delta_S}{2}, \frac{\delta_{NE} + \delta_{SW}}{2}$ и т. д.). Эти элементы вычисляются в схеме только однократно, но используются во всех предусмотренных формулами случаях.

Учащемуся предлагается самостоятельно проследить по схеме вычисление каждого коэффициента девиации. Для уяснения устройства схемы рекомендуется обращаться к расчетным формулам.

На некоторых иностранных флотах вычисление коэффициентов выполняется по другой схеме (табл. 8), составленной также на основе формулы (68).

Вычисления по схемам следует производить с точностью до $0^\circ,01$ с последующим округлением величин коэффициентов до $0^\circ,1$.

По вычисленным приближенным коэффициентам можно судить о магнитных условиях работы компаса. Так, например, если наибольшим из полученных коэффициентов является коэффициент B , то это означает, что на компасе преобладает полукруговая девиация от силы $B' \lambda H$. Малые значения коэффициентов A и E свидетельствуют о том, что девиации от сил $A' \lambda H$ (постоянная) и $E' \lambda H$ (четвертная) малы и т. д.

В заключение отметим, что рассмотренный метод вычисления коэффициентов девиации уменьшает влияние только случайных ошибок наблюдений. Что же касается систематических ошибок, то при вы-

Таблица 8

Компасные курсы	δ	Множители	B°		C°		D°		E°	
			$\delta \cdot \text{Мн.}$	Множители	$\delta \cdot \text{Мн.}$	Множители	$\delta \cdot \text{Мн.}$	Множители	$\delta \cdot \text{Мн.}$	
0°	-0°,3	0	0	1	-0°,30	0	0	1	-0°,30	
45	-0°,8	S_4	-0,57	S_4	-0,57	1	-0,80	0	0	
90	-0°,8	1	-0,80	0	0	0	0	-1	+0°,80	
135	-0°,3	S_4	-0,21	$-S_4$	+0,21	-1	+0,30	0	0	
180	+0°,2	0	0	-1	-0,20	0	0	1	+0°,20	
225	+0°,7	$-S_4$	-0,50	$-S_4$	-0,50	1	+0,70	0	0	
270	+0°,2	-1	-0,20	0	0	0	0	-1	-0°,20	
315	-0°,4	$-S_4$	+0,28	S_4	-0,28	-1	+0,40	0	0	
+	1,1	+	0,28	+	0,21	+	1,4	+	1,0	
-	2,6	-	2,28	-	1,85	-	0,8	-	0,5	
8A=-1,5 A=-0°,2		4B=-2,0 B=-0°,5		4C=-1,64 C=-0°,4		4D=+0,6 D=+0°,2		4E=+0,5 E=+0°,1		

числении коэффициентов на основе формулы (68) они войдут в величину коэффициента A .

Вычисление таблицы девиации по известным коэффициентам. Заключительная часть работы по составлению таблицы девиации, т. е. вычисление девиации для 24 или 36 равноотстоящих компасных курсов по известным коэффициентам, также выполняется на основе формулы (68).

В этом случае известными величинами являются коэффициенты A , B , C , D и E и заданные компасные курсы, а неизвестной — девиация δ . Вычисление δ можно выполнять непосредственно по формуле, подставляя в нее значения коэффициентов и курса. Например, для вычисления девиации для компасного курса N нужно подставить в формулу выраженные в градусах величины коэффициентов и курса 0° и выполнить все предусмотренные формулой математические операции.

При таком методе работы для получения таблицы девиации на 24 или 36 курсов нам пришлось бы решить соответственно 24 или 36 уравнений.

Между тем можно значительно сократить вычислительную работу. Для этого перепишем расчетную формулу (68), изменив порядок слагаемых:

$$\delta = D \sin 2k' + E \cos 2k' + A + B \sin k' + C \cos k'.$$

Первые два слагаемых ($D \sin 2k'$ и $E \cos 2k'$) правой части формулы представляют четвертную девиацию компаса. При четном числе курсов в вычисляемой таблице любому значению курса k'_1 найдется обратное значение курса k'_2 . Но для курсов, отличающихся друг от

друга на 180° , множители при коэффициенте D имеют одинаковые величины и знаки:

$$\sin 2k'_2 = \sin 2(k'_1 + 180^\circ) = \sin 2k'_1.$$

То же самое можно сказать и о множителях при коэффициенте E :

$$\cos 2k'_2 = \cos 2(k'_1 + 180^\circ) = \cos 2k'_1.$$

Следовательно, слагаемые $D \sin 2k'$ и $E \cos 2k'$ и их сумму достаточно вычислить только для половины компасных курсов, т. е. для первых 12 или 18 курсов. Для курсов другой половины картушки эти величины просто переписуются в готовом виде.

Третье слагаемое — постоянная девиация A — на всех курсах имеет одинаковую величину и знак и при вычислении таблицы девиации учитывается как постоянное слагаемое.

Последние два слагаемых $B \sin k'$ и $C \cos k'$ характеризуют полукруговую девиацию. На обратных курсах множители при этих коэффициентах сохраняют свои величины, но изменяют знаки:

$$\sin k'_2 = \sin(k'_1 + 180^\circ) = -\sin k'_1;$$

$$\cos k'_2 = \cos(k'_1 + 180^\circ) = -\cos k'_1.$$

Таким образом, слагаемые $B \sin k'$ и $C \cos k'$ и их сумму также достаточно вычислить только для первой половины общего числа курсов таблицы. Для остальных курсов нужно взять готовые величины этих слагаемых, но с обратными знаками.

Обозначив сумму четвертных девиаций через α , постоянную девиацию — через β и сумму полукруговых девиаций — через γ , можем написать схематические формулы для составления таблицы девиации: для первых 12 (18) курсов

$$\delta = \alpha + \beta + \gamma,$$

для остальных 12 (18) курсов

$$\delta = \alpha + \beta - \gamma.$$

На основании этих формул составлена схема (табл. 9), предназначенная для вычисления таблицы девиации на 24 равноотстоящих компасных курса.

Занеся в схему выраженные в градусах величины коэффициентов с их знаками и выполнив предусмотренные схемой математические операции, получим таблицу девиации на курсы через 15° . Для упрощения вычислений все множители при коэффициентах приведены к одной тригонометрической функции — синусу. Вычисления следует выполнять с точностью до $0^\circ,01$, а вычисленные девиации округлить до $0^\circ,1$.

В некоторых случаях таблица остаточной девиации вычисляется по другой схеме — через 10° , т. е. для 36 равноотстоящих курсов (табл. 10).

$$\delta^\circ = \left[\frac{\frac{IV}{(D^\circ \sin 2k' + E^\circ \cos 2k') + A^\circ}}{\frac{III}{I \cdot II}} \right] \pm \left(\frac{VII}{\frac{B^\circ \sin k' + C^\circ \cos k'}{VI}} \right)$$

D = + 0°, 2		E = + 0°, 1		III	[IV]		B = - 0°, 5		C = - 0°, 4		VII	KK	δ	KK	δ
Mн	I	Mн	II		A = - 0°, 2	Mн	V	Mн	VI	Mн					
	D° · Mн		E° · Mн	I + II							III + A	B° · Mн	C° · Mн		
0	0	1	+0,10	+0,10	-0,10	0	0	1	-0,40	-0,40	N° 0	-0°, 5	S 180°	+0°, 3	
S ₃₀	+0,10	S ₆₀	+0,09	+0,19	-0,01	S ₁₅	-0,13	S ₇₅	-0,39	-0,52	15	-0, 5	195	+0, 5	
S ₆₀	+0,17	S ₃₀	+0,05	+0,22	+0,02	S ₃₀	-0,25	S ₆₀	-0,35	-0,60	30	-0, 6	210	+0, 6	
I	+0,20	0	0	+0,20	0	S ₄₅	-0,35	S ₄₅	-0,28	-0,63	45	-0, 6	225	+0, 6	
S ₆₀	+0,17	-S ₃₀	-0,05	+0,12	-0,08	S ₆₀	-0,43	S ₃₀	-0,20	-0,63	60	-0, 7	240	+0, 6	
S ₃₀	+0,10	-S ₆₀	-0,09	+0,01	-0,19	S ₇₅	-0,48	S ₁₅	-0,10	-0,58	75	-0, 8	255	+0, 4	
0	0	-1	-0,10	-0,10	-0,30	I	-0,50	0	0	-0,50	E 90	-0, 8	W 270	+0, 2	
-S ₃₀	-0,10	-S ₆₀	-0,09	-0,19	-0,39	S ₇₅	-0,48	-S ₁₅	+0,10	-0,38	105	-0, 8	285	0	
-S ₆₀	-0,17	-S ₃₀	-0,05	-0,22	-0,42	S ₆₀	-0,43	-S ₃₀	+0,20	-0,23	120	-0, 6	300	-0, 2	
-1	-0,20	0	0	-0,20	-0,40	S ₄₅	-0,35	-S ₄₅	+0,28	-0,07	135	-0, 5	315	-0, 3	
-S ₆₀	-0,17	S ₃₀	+0,05	-0,12	-0,32	S ₃₀	-0,25	-S ₆₀	+0,35	+0,10	150	-0, 2	330	-0, 4	
-S ₃₀	-0,10	S ₆₀	+0,09	-0,01	-0,21	S ₁₅	-0,13	-S ₇₅	+0,39	+0,26	165	+0, 1	345	-0, 5	

Таблица 10

I		II		III	IV		V		VI		VII	VIII		IX	
D = + 0°, 2		E = + 0°, 1			A = - 0°, 2	B = - 0°, 5		C = - 0°, 4		V + VI		KK	δ	KK	δ
Mн	D × Mн.	Mн.	E × Mн.	I + II		III + A	Mн.	B × Mн.	Mн.		C × Mн.				
	0		0	1	+0,10					+0,10		-0,10	0	0	1
S ₂₀	+0,07	S ₇₀	+0,09	+0,16	-0,04	S ₁₀	-0,09	S ₈₀	-0,39	-0,48	10	-0, 5	190	+0, 4	
S ₄₀	+0,13	S ₅₀	+0,08	+0,21	+0,01	S ₂₀	-0,17	S ₇₀	-0,38	-0,55	20	-0, 5	200	+0, 6	
S ₆₀	+0,17	S ₃₀	+0,05	+0,22	+0,02	S ₃₀	-0,25	S ₆₀	-0,35	-0,60	30	-0, 6	210	+0, 6	
S ₈₀	+0,20	S ₁₀	+0,02	+0,22	+0,02	S ₄₀	-0,32	S ₅₀	-0,31	-0,63	40	-0, 6	220	+0, 6	
S ₈₀	+0,20	-S ₁₀	-0,02	+0,18	-0,02	S ₅₀	-0,38	S ₄₀	-0,26	-0,64	50	-0, 7	230	+0, 6	
S ₆₀	+0,17	-S ₃₀	-0,05	+0,12	-0,08	S ₆₀	-0,43	S ₃₀	-0,20	-0,63	60	-0, 7	240	+0, 5	
S ₄₀	+0,13	-S ₅₀	-0,08	+0,05	-0,15	S ₇₀	-0,47	S ₂₀	-0,14	-0,61	70	-0, 8	250	+0, 5	
S ₂₀	+0,07	-S ₇₀	-0,09	-0,02	-0,22	S ₈₀	-0,49	S ₁₀	-0,07	-0,56	80	-0, 8	260	+0, 3	
0	0	-1	-0,10	-0,10	-0,30	I	-0,50	0	0	-0,50	90	-0, 8	270	+0, 2	
-S ₂₀	-0,07	-S ₇₀	-0,09	-0,16	-0,36	S ₈₀	-0,49	-S ₁₀	+0,07	-0,42	100	-0, 8	280	+0, 1	
-S ₄₀	-0,13	-S ₅₀	-0,08	-0,21	-0,41	S ₇₀	-0,47	-S ₂₀	+0,14	-0,33	110	-0, 7	290	-0, 1	
-S ₆₀	-0,17	-S ₃₀	-0,05	-0,22	-0,42	S ₆₀	-0,43	-S ₃₀	+0,20	-0,23	120	-0, 6	300	-0, 2	
-S ₈₀	-0,20	-S ₁₀	-0,02	-0,22	-0,42	S ₅₀	-0,38	-S ₄₀	+0,26	-0,12	130	-0, 5	310	-0, 3	
-S ₈₀	-0,20	S ₁₀	+0,02	-0,18	-0,38	S ₄₀	-0,32	-S ₅₀	+0,31	-0,01	140	-0, 4	320	-0, 4	
-S ₆₀	-0,17	S ₃₀	+0,05	-0,12	-0,32	S ₃₀	-0,25	-S ₆₀	+0,35	+0,10	150	-0, 2	330	-0, 4	
-S ₄₀	-0,13	S ₅₀	+0,08	-0,05	-0,25	S ₂₀	-0,17	-S ₇₀	+0,38	+0,21	160	0	340	-0, 5	
-S ₂₀	-0,07	S ₇₀	+0,09	+0,02	-0,18	S ₁₀	-0,09	-S ₈₀	+0,39	+0,30	170	+0, 1	350	-0, 5	

Укажем еще раз общий порядок работы при составлении таблицы остаточной девиации:

определить остаточную девиацию компаса на восьми главных и четвертных компасных курсах;

вычислить по схеме (табл. 7) коэффициенты A, B, C, D, E ;

по известным коэффициентам вычислить таблицу девиации для 24 или 36 равноотстоящих компасных курсов, пользуясь схемой, приведенной в табл. 9.

По результатам вычислений заполнить бланк таблицы девиации, указав в нем дату работы, условия и способ определения девиаций и другие предусмотренные там сведения.

Для облегчения вычислительной работы можно воспользоваться таблицами «Произведения дуг на синусы румбов через 10° и 15° », помещенными в Девиационных и Мореходных таблицах.

Благодаря применению способа наименьших квадратов вычисленные табличные девиации по своей величине более близки к действительным величинам, чем девиации, полученные из наблюдений. На этом основании по окончании вычислений таблицы можно проконтролировать результаты определения девиации. Контроль сводится к сравнению вычисленной и наблюдаемой девиаций на одинаковых курсах. Например, сравнивая девиацию, взятую из таблицы для ком-

Таблица 11

КК	ОИП	d	ОМП	ОКП	δ	$\delta_{\text{ср}}$
0° (N)	151°,0	+2°,1	148°,9	149°,4	-0°,5	-0°,4
	150,6		148,5	148,9	-0,4	
	150,3		148,2	148,6	-0,4	
45 (NE)	150,0	+2,1	147,9	148,8	-0,9	-0,9
	149,5		147,4	148,4	-1,0	
	149,2		147,1	147,9	-0,8	
90 (E)	150,6	+2,1	148,5	148,1	+0,4	+0,5
	150,3		148,2	147,8	+0,4	
	150,0		147,9	147,3	+0,6	
135 (SE)	149,5	+2,1	147,4	146,2	+1,2	+1,1
	149,2		147,1	146,1	+1,0	
	148,8		146,7	145,6	+1,1	
180 (S)	150,0	+2,1	147,9	148,6	-0,7	-0,7
	150,6		148,5	149,2	-0,7	
	151,0		148,9	149,5	-0,6	
225 (SW)	150,3	+2,1	148,2	149,9	-1,7	-1,6
	150,7		148,6	150,2	-1,6	
	151,2		149,1	150,6	-1,5	
270 (W)	149,2	+2,1	147,1	147,0	+0,1	+0,2
	149,5		147,4	147,2	+0,2	
	150,0		147,9	147,6	+0,3	
315 (NW)	148,8	+2,1	146,7	145,6	+1,1	+1,1
	149,5		147,4	146,2	+1,2	
	150,3		148,2	147,1	+1,1	

Таблица 12

КК	I	КК	II	III	IV	К	V	К	VI	VII	VIII	IX	X	
	δ		δ	$\frac{1}{2}(I+II)$	$\frac{1}{2}(I-II)$		$K \cdot IV$		$K \cdot IV$	Верхняя половина ст. III	Нижняя половина ст. III	$\frac{1}{2}(VI+VIII)$	$\frac{1}{2}(VII--VIII)$	
N	-0°,4	S	-0°,7	-0°,55	+0°,15	0	0°,0	1	+0°,15	-0,55	+0,35	-0,10	-0°,4	=E
NE	-0,9	SW	-1,6	-1,25	+0,35	S ₄₅	+0,25	S ₄₅	+0,25	-1,25	+1,10	-0,08	-1°,2	=D
E	+0,5	W	+0,2	+0,35	+0,15	1	+0,15	0	0,0			-		
SE	+1,1	NW	+1,1	+1,10	0,0	S ₄₅	0,0	-S ₄₅	0,0			$\Sigma =$	-0,18	
							+	0,40	+	0,40		$\frac{1}{2} \Sigma =$	-0°,1	=A
							-	-	-					
							Σ	+0,40	Σ	+0,40				Контроль X + IX = VII
							$\frac{1}{2} \Sigma$	+0°,2	$\frac{1}{2} \Sigma$	+0°,2				=C
														Контроль III + IV = I
														B =

$D = -1^{\circ}, 2$		$E = -0^{\circ}, 4$		III	IV		$B = +0^{\circ}, 2$		$C = +0^{\circ}, 2$		VII	КК	δ	КК	δ
Мн.	I	Мн.	II		A = $-0^{\circ}, 1$	Мн.	V	Мн.	VI	V+VI					
	D° · Мн.		E° · Мн.	I+II			III+A		B° · Мн.		V+VI				
0	0	1	-0,40	-0,40	-0,50	0	0	1	+0,20	+0,20	N0°	-0°,3	S180°	-0°,7	
S ₃₀	-0,60	S ₆₀	-0,35	-0,95	-1,05	S ₁₅	+0,05	S ₇₅	+0,19	+0,24	15	-0,8	195	-1,3	
S ₆₀	-1,04	S ₃₀	-0,20	-1,24	-1,34	S ₃₀	+0,10	S ₆₀	+0,17	+0,27	30	-1,1	210	-1,6	
1	-1,20	0	0	-1,20	-1,30	S ₄₅	+0,14	S ₄₅	+0,14	+0,28	45	-1,0	225	-1,6	
S ₆₀	-1,04	-S ₃₀	+0,20	-0,84	-0,94	S ₆₀	+0,17	S ₃₀	+0,10	+0,27	60	-0,7	240	-1,2	
-S ₃₀	-0,60	-S ₆₀	+0,35	-0,25	-0,35	S ₇₅	+0,19	S ₁₅	+0,05	+0,24	75	-0,1	255	-0,6	
0	0	-1	+0,40	+0,40	+0,30	1	+0,20	0	0	+0,20	E90	+0,5	W270	+0,1	
-S ₃₀	+0,60	-S ₆₀	+0,35	+0,95	+0,85	S ₇₅	+0,19	-S ₁₅	-0,05	+0,14	105	+1,0	285	+0,7	
-S ₆₀	+1,04	-S ₃₀	+0,20	+1,24	+1,14	S ₆₀	+0,17	-S ₃₀	-0,10	+0,07	120	+1,2	300	+1,1	
-1	+1,20	0	0	+1,20	+1,10	S ₄₅	+0,14	-S ₄₅	-0,14	0	135	+1,1	315	+1,1	
-S ₆₀	+1,04	S ₃₀	-0,20	+0,84	+0,74	S ₃₀	+0,10	-S ₆₀	-0,17	-0,07	150	+0,7	330	+0,8	
-S ₃₀	+0,60	S ₆₀	-0,35	+0,25	+0,15	S ₁₅	+0,05	-S ₇₅	-0,19	-0,14	165	0	345	+0,3	

насного курса 45° , с девиацией, полученной из наблюдений на том же курсе, можно судить о точности определения девиации на $КК\ 45^\circ$.

Если разность значений девиации хотя бы на одном из восьми курсов превосходит $0^\circ,3-0^\circ,4$, то это свидетельствует о значительных случайных ошибках в наблюдаемой девиации. В таких случаях необходимо повторить определение девиации и вычислить таблицу по новым данным.

Указанный способ контроля применим при условии, что остаточная девиация мала и на компасе отсутствуют девиации высших порядков (см. гл. X).

Чтобы убедиться, что при вычислениях не допущено грубых ошибок, по окончании составления таблицы рекомендуется вычерчивать график остаточной девиации, который должен представлять собой кривую периодической функции, сдвинутую относительно оси абсцисс на величину коэффициента A в принятом масштабе. Точки, нанесенные на график по результатам ошибочных вычислений, не будут лежать на такой кривой.

Приведем пример определения девиации и вычисления таблицы девиации по изложенному выше методу.

Пример. 20 ноября 1969 г. Теплоход К. Главный магнитный компас $КЛМ-1м$ № 020. Место определения девиации: рейд порта Р. Состояние погоды. ветер NW 3 балла; волнение 1 балл; видимость 8 миль. Осадка судна 6,8 м. Глубины в районе работы 12—20 м. Судовые стрелы закреплены по-походному.

1. Определили девиацию по вееру створов на восьми главных и четвертных компасных курсах. Результаты наблюдений обработали по схеме (табл. 11).

2. По девиациям, полученным из наблюдений на восьми компасных курсах, вычислили коэффициенты A, B, C, D и E , пользуясь схемой (табл. 12).

Вычисленные коэффициенты ($A = -0^\circ, 1$; $B = +0^\circ, 2$; $C = +0^\circ, 2$; $D = -1^\circ, 2$; $E = -0^\circ, 4$) показывают, что полукруговая девиация компаса уничтожена практически полностью; несколько хуже уничтожена четвертная девиация, в частности девиация от силы $D\Delta H$. В целом же уничтожение девиации выполнено хорошо.

3. По известным коэффициентам вычислили таблицу девиации для 24 компасных курсов. Все вычисления производили по схеме (табл. 13). При этом для облегчения работы пользовались таблицей «Произведения дуг на синусы румбов» Девиационных таблиц, понимая под дугой A величины коэффициентов, выраженные в градусах.

Сравнив вычисленные значения девиаций с наблюдаемыми на главных и четвертных компасных курсах, убедились, что разность их величин не превосходит $0^\circ, 1$.

Отсюда заключили, что определение девиации выполнено без существенных ошибок.

Занесли вычисленные величины δ в таблицу девиации и пользовались ею при исправлении курсов и пеленгов.

§ 17. УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЕВИАЦИИ

Если регулярные определения поправки компаса во время плавания судна показывают, что табличные значения девиации не соответствуют же действительным величинам, то необходимо вычислить новую таблицу девиации. Как уже говорилось ранее, для ее составления следует

произвести наблюдения девиации на восьми компасных курсах по береговому ориентиру, а в открытом море — по сличению с гирокомпасом или по пеленгам небесных светил. Однако в некоторых случаях выполнить наблюдения на всех восьми курсах по тем или иным причинам не представляется возможным. Тогда пользуются упрощенным методом определения девиации и вычисления коэффициентов.

При этом исходят из предположений, что во время плавания судна наибольшим изменениям подвержена полукруговая девиация компаса, характеризуемая коэффициентами B и C , а остальные девиации изменяются незначительно. (Отметим, что эти предположения вполне согласуются с практикой.)

Поэтому применяя упрощенный метод, ограничиваются определениями девиации на четырех главных компасных курсах 0° , 90° , 180° и 270° .

Из формулы (68) следует, что наблюдаемая на указанных курсах девиация выражается уравнениями:

$$\delta_N = A + C + E, \quad \delta_S = A - C + E, \quad \delta_E = A + B - E, \quad \delta_W = A - B - E.$$

Решая их обычными алгебраическими способами, получим значения коэффициентов:

$$B = \frac{\delta_E - \delta_W}{2}; \quad C = \frac{\delta_N - \delta_S}{2};$$

$$A = \frac{\delta_N + \delta_S + \delta_E + \delta_W}{4}; \quad E = \frac{(\delta_N + \delta_S) - (\delta_E + \delta_W)}{4}.$$

Можно применять формулы, в правой части которых вместо девиации записываются непосредственно наблюдаемые компасные пеленги ($KП$) или отсчеты компасных пеленгов ($ОКП$).

В этом случае формула для вычисления, например, коэффициента B выглядит так:

$$B = \frac{ОКП_W - ОКП_E}{2} \text{ или } B = \frac{КП_W - КП_E}{2}.$$

Действительно:

$$ОКП_W = ОМП - \delta_W = ОМП - (A - B - E);$$

$$ОКП_E = ОМП - \delta_E = ОМП - (A + B - E).$$

Отсюда

$$ОКП_W - ОКП_E = 2B$$

и

$$\frac{ОКП_W - ОКП_E}{2} = B.$$

Аналогично можно найти формулы для вычисления коэффициентов C и E :

$$C = \frac{ОКП_S - ОКП_N}{2};$$

$$E = \frac{(ОКП_E - ОКП_W) - (ОКП_N + ОКП_S)}{4}.$$

Коэффициент A вычисляют по формуле

$$A = ОМП - \frac{\sum_1^4 ОКП}{4}.$$

Коэффициент D по наблюдениям на главных курсах найти нельзя поэтому его величину выбирают из прежней таблицы девиации. Вычисление таблицы девиации по найденным коэффициентам выполняется как обычно по схеме для 24 или 36 компасных курсов.

В заключение отметим, что в полученные по упрощенным формулам коэффициенты A , B , C , а значит, и в вычисленную по этим величинам девиацию целиком войдут случайные ошибки пеленгования. В связи с этим рассмотренный способ составления таблицы можно рекомендовать только в виде исключения.

§ 18. ИСПРАВЛЕНИЕ ТАБЛИЦЫ ДЕВИАЦИИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ОТДЕЛЬНЫХ КУРСАХ

Предположим, что при определении поправок компаса на нескольких отдельных курсах обнаружено расхождение между девиациями, полученными из наблюдений, и табличными значениями девиации. Если эти расхождения велики — больше $0,3-0,5^\circ$, то возникает необходимость в исправлении таблицы девиации. Поставим перед собой задачу исправить таблицу, не делая никаких дополнительных наблюдений, а используя уже имеющиеся результаты определений поправок компаса на отдельных курсах. При решении задачи будем предполагать, что изменения табличных значений девиации являются следствием изменений только полукруговых коэффициентов B и C , остальные же коэффициенты сохраняют прежнюю величину.

Напишем формулу (68), послужившую основой для расчета таблицы девиации, в следующем виде:

$$\delta_c = A + B_c \sin k' + C_c \cos k' + D \sin 2k' + E \cos 2k',$$

где B_c и C_c — прежние значения коэффициентов полукруговой девиации. Изменившись за время плавания, эти коэффициенты примут новые значения B_n и C_n , в результате чего суммарная девиация компаса будет иметь величину

$$\delta_n = A + B_n \sin k' + C_n \cos k' + D \sin 2k' + E \cos 2k'.$$

Вычитая из второго выражения первое, найдем приращение девиации:

$$\Delta\delta = \delta_n - \delta_c = (B_n - B_c) \sin k' + (C_n - C_c) \cos k'$$

или

$$\Delta\delta = \Delta B \sin k' + \Delta C \cos k'.$$

циенты и таблицу девиации. Величины коэффициентов были следующими: $A = -0^{\circ},2$; $B = +0^{\circ},4$; $C = -0^{\circ},7$; $D = -0^{\circ},5$; $E = +0^{\circ},2$.

Когда в порту назначения груз металла был выгружен и судно вновь вышло в море, результаты определения поправки компаса показали, что девиация изменилась. Эти изменения выражались такими цифрами:

на $KK\ 102^{\circ}$ — $\Delta\delta_1 = +2^{\circ},3$;

на $KK\ 197^{\circ}$ — $\Delta\delta_2 = +0^{\circ},6$;

на $KK\ 347^{\circ}$ — $\Delta\delta_3 = -1^{\circ},5$.

Считая, что изменение претерпели только коэффициенты полукруговой девиации, задались целью определить их новые значения и вычислить таблицу девиации.

На листе миллиметровой бумаги, задавшись масштабом $5\text{ см} = 1^{\circ}$, провели из начала координат, из точки O , прямые по направлениям тех компасных курсов 102 , 197 и 347° , на которых была определена поправка компаса (см. рис. 49). На этих прямых отложили отрезки OK_1 , OK_2 и OK_3 , выражающие в принятом масштабе величины изменения девиации: $OK_1 = \Delta\delta_1 = +2^{\circ},3$; $OK_2 = \Delta\delta_2 = +0^{\circ},6$; $OK_3 = \Delta\delta_3 = -1^{\circ},5$. Отрезок OK_3 отложили по направлению $347^{\circ} - 180^{\circ} = 167^{\circ}$, так как приращение девиации $\Delta\delta_3$ имеет отрицательный знак.

Затем через точки K_1 , K_2 , K_3 перпендикулярно отрезкам OK_1 , OK_2 и OK_3 провели прямые I—I, II—II и III—III. В результате получили треугольник, малые размеры которого позволили принять вероятнейшее положение точки P в центре фигуры. Опустив из точки P перпендикуляры PP_1 и PP_2 на координатные оси x и y , получили отрезки OP_1 и OP_2 . Первый из них оказался равным $+1^{\circ},9$, а второй $-1^{\circ},2$. Следовательно,

$$\Delta B = +1^{\circ},9; \Delta C = -1^{\circ},2.$$

Далее вычислили

$B_{\text{н}} = B_{\text{с}} + \Delta B = +0^{\circ},4 + 1^{\circ},9 = +2^{\circ},3$; $C_{\text{н}} = C_{\text{с}} + \Delta C = -0,7 + (-1^{\circ},2) = -1^{\circ},9$ и рассчитали новую таблицу девиации по коэффициентам:

$$A = -0^{\circ},2; B = +2^{\circ},3; C = -1^{\circ},9; D = -0^{\circ},5; E = +0^{\circ},2.$$

Глава V

УНИЧТОЖЕНИЕ ПОЛУКРУГОВОЙ ДЕВИАЦИИ

§ 19. ОБЩИЕ ОСНОВАНИЯ УНИЧТОЖЕНИЯ ДЕВИАЦИИ

В начальный период развития магнитно-компасного дела среди специалистов длительное время велась дискуссия о том, какие меры нужно принимать на судне для обеспечения надежности и точности показаний магнитного компаса.

Многие ученые утверждали, что единственно необходимой мерой, гарантирующей безопасность плавания судна по показаниям компаса, является определение и учет девиации как поправки. Причем эта рекомендация давалась для всех случаев независимо от того, какую величину имеет девиация.

Мы получили одно уравнение с двумя неизвестными ΔB и ΔC . Но если определить девиацию на двух каких-либо компасных курсах k'_1 и k'_2 , то можно составить два уравнения, и из них найти ΔB и ΔC :

$$\begin{aligned}\Delta\delta_1 &= \Delta B \sin k'_1 + \Delta C \cos k'_1; \\ \Delta\delta_2 &= \Delta B \sin k'_2 + \Delta C \cos k'_2.\end{aligned}\quad (80)$$

Найдем ΔB из первого уравнения:

$$\Delta B = \frac{\Delta\delta_1 - \Delta C \cos k'_1}{\sin k'_1}.$$

Подставив выражение для ΔB во второе уравнение, получим:

$$\Delta\delta_2 = \frac{(\Delta\delta_1 - \Delta C \cos k'_1) \sin k'_2}{\sin k'_1} + \Delta C \cos k'_2,$$

или

$$\Delta\delta_2 \sin k'_1 = \Delta\delta_1 \sin k'_2 - \Delta C \cos k'_1 \sin k'_2 + \Delta C \sin k'_1 \cos k'_2.$$

Отсюда

$$\Delta C = \frac{\Delta\delta_2 \sin k'_1 - \Delta\delta_1 \sin k'_2}{\sin k'_1 \cos k'_2 - \cos k'_1 \sin k'_2}.$$

или окончательно

$$\Delta C = \frac{\Delta\delta_2 \sin k'_1 - \Delta\delta_1 \sin k'_2}{\sin (k'_1 - k'_2)}. \quad (81)$$

Аналогично получим

$$\Delta B = \frac{\Delta\delta_2 \cos k'_1 - \Delta\delta_1 \cos k'_2}{\sin (k'_2 - k'_1)}. \quad (82)$$

Прибавив величины ΔB и ΔC к прежним значениям коэффициентов полукруговой девиации, получим более близкие к действительным коэффициенты B_H и C_H :

$$B_H = B_c + \Delta B; \quad C_H = C_c + \Delta C.$$

Таким образом, выполненные на двух компасных курсах наблюдения позволяют внести коррективы в существующую таблицу девиации.

Практически работа сводится к следующему:

определяют девиацию компаса на двух любых компасных курсах k'_1 и k'_2 ;

выбирают из прежней таблицы величины девиации и для тех же компасных курсов и составляют разности наблюдаемых и табличных величин девиации, т. е. находят $\Delta\delta_1$ и $\Delta\delta_2$;

по величинам $\Delta\delta_1$, $\Delta\delta_2$, k'_1 и k'_2 вычисляют ΔB и ΔC , пользуясь формулами (81) и (82);

выбирают из таблицы девиации значения коэффициентов B_c и C_c , а также A , D и E ; составляют алгебраические суммы $B_c + \Delta B$ и $C_c + \Delta C$ и вычисляют новые величины коэффициентов полукруговой девиации (B_n и C_n);

по коэффициентам A , D , E , B_n и C_n вычисляют новую таблицу девиации для 24 или 36 компасных курсов.

Примечание В связи с тем что при исправлении таблицы учитываются изменения только полукруговой девиации, желательно, чтобы курсы k'_1 и k'_2 , на которых производится определение девиации, были близки к главным компасным курсам и отличались друг от друга на величину, примерно равную 90° . При соблюдении указанного требования одна из наблюдаемых девиаций позволит более достоверно судить об изменении коэффициента B , а вторая — об изменении коэффициента C .

Изложенный способ уточнения таблицы девиации отличается своей простотой. Вместе с тем он имеет и существенный недостаток: точность коэффициентов B_n и C_n всецело зависит от точности определения девиации.

Для получения более надежных результатов необходимо иметь избыточные наблюдения, т. е. определить девиацию не на двух, а на большем числе компасных курсов, а затем обработать результаты наблюдений по способу наименьших квадратов.

Пусть, например, определены величины девиации на трех компасных курсах k_1 , k_2 и k_3 . Составив разности наблюдаемых девиаций с соответствующими табличными девиациями для одноименных курсов, можем написать три уравнения:

$$\Delta B \sin k'_1 + \Delta C \cos k'_1 - \Delta\delta_1 = \epsilon_1,$$

$$\Delta B \sin k'_2 + \Delta C \cos k'_2 - \Delta\delta_2 = \epsilon_2,$$

$$\Delta B \sin k'_3 + \Delta C \cos k'_3 - \Delta\delta_3 = \epsilon_3.$$

где ϵ_1 , ϵ_2 и ϵ_3 — случайные ошибки наблюдений.

Если умножить каждое из этих уравнений на множители при неизвестных ΔB и ΔC , а затем сложить получившиеся выражения, то исходные уравнения будут приведены к нормальным уравнениям. Из последних обычным алгебраическим путем можем найти величины ΔB и ΔC , которые будут близки к действительным значениям приращений полукруговых коэффициентов.

Для завершения работы останется найти новые значения коэффициентов полукруговой девиации по формулам:

$$B_n = B_c + \Delta B, \quad C_n = C_c + \Delta C,$$

а затем вычислить новую таблицу девиации.

Такой аналитический способ исправления таблицы девиации применим при наблюдении девиации на любом количестве курсов $k'_1, k'_2, k'_3, \dots, k'_n$, причем порядок обработки результатов во всех

случаях остается одинаковым, изменяется лишь количество исходных уравнений и несколько усложняется расчет коэффициентов нормальных уравнений.

Несмотря на хорошую точность этого способа получения новой таблицы девиации, рекомендовать его для практического применения не вполне целесообразно в связи со сложностью вычислительной работы по составлению и решению нормальных уравнений. На практике более приемлем графический прием определения величин ΔB и ΔC , основанный на хорошо знакомых и часто выполняемых судоводителем построениях.

Для обоснования графического способа напомним уравнения (80), характеризующие изменения девиации компаса за счет изменений полукруговых коэффициентов, для случая, когда наблюдения девиации выполнены на n компасных курсах:

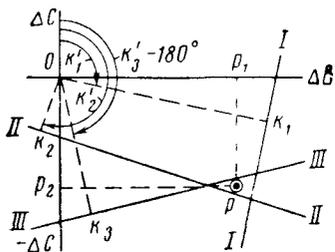


Рис. 49

$$\begin{aligned} \Delta \delta_1 &= \Delta B \sin k'_1 + \Delta C \cos k'_1; \\ \Delta \delta_2 &= \Delta B \sin k'_2 + \Delta C \cos k'_2; \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta \delta_n &= \Delta B \sin k'_n + \Delta C \cos k'_n. \end{aligned} \quad (83)$$

Эти уравнения идентичны уравнениям ошибок высотных линий положения, известным из курса мореходной астрономии:

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= \Delta W \sin A_1 + \Delta \varphi \cos A_1; \\ \Delta h_2 &= \Delta W \sin A_2 + \Delta \varphi \cos A_2; \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta h_n &= \Delta W \sin A_n + \Delta \varphi \cos A_n, \end{aligned} \quad (84)$$

где $\Delta \varphi$ и ΔW — приращения широты φ и отшествия W ;
 A_1, A_2, \dots, A_n — счислимые азимуты светил;
 $\Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_n$ — переносы линий положения, откладываемые по направлениям A_1, A_2, \dots, A_n .

Уравнения (84) служат основой для широко известного графического способа определения места судна по высотным линиям положения. Напомним, что при работе этим способом штурман, приняв за начало координат счислимое место судна, откладывает в определенном масштабе известные величины $\Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_n$ по направлениям счислимых азимутов A_1, A_2, \dots, A_n , а затем, проведя линии положения, находит значения $\Delta \varphi$ и ΔW и место судна.

Такое же графическое построение может быть применено и для определения приращений ΔB и ΔC коэффициентов полукруговой девиации компаса.

Из сравнения систем (83) и (84) видим, что величинам $\Delta \varphi$ и ΔW можно поставить в соответствие величины ΔC и

ΔB ; величинам A_1, A_2, \dots, A_n — выраженные в градусах значения k', k'_2, \dots, k'_n и, наконец, величинам переносов $\Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_n$ — известные значения $\Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \dots, \Delta \delta_n$.

Исходя из этих сопоставлений, приходим к следующему методу графического определения ΔB и ΔC по девиациям, наблюдаемым на случайных курсах k'_1, k'_2, \dots, k'_n (рис. 49).

1. На листе миллиметровой бумаги выбираем произвольно точку O , которую принимаем за начало координат.

2. Из точки O проводим взаимно перпендикулярные координатные оси x и y и задаемся произвольным линейным масштабом.

3. Приняв направление положительной полуоси Oy за нулевое направление, проводим из точки O под углами, равными величинам компасных курсов k'_1, k'_2, \dots, k'_n , прямые OK_1, OK_2, \dots, OK_n .

4. На указанных прямых в принятом масштабе откладываем значения $\Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \dots, \Delta \delta_n$ (разности наблюдаемых и табличных значений девиации) с учетом их знака. При этом на прямой OK_1 откладывается отрезок, выражающий приращение девиации для курса k'_1 , на прямой OK_2 — отрезок, соответствующий $\Delta \delta_2$ для курса k'_2 , и т. д.

5. Через концы отрезков проводим перпендикулярные прямые I—I, II—II, ..., N—N (линии положения), которые в частном случае пересекаются в точке P .

6. Опускаем из точки P перпендикуляры на координатные оси и, получив таким образом отрезки OP_1 и OP_2 , сопоставляем их с отрезком, выражающим единицу принятого масштаба. В результате получим искомые величины ΔB (по оси x) и ΔC в градусах.

Далее находим B_n и C_n и вычисляем новую таблицу девиации.

Поскольку в общем случае линии положения не пересекаются в одной точке, а образуют фигуру погрешности, то вероятнейшее место (точка P) определяется дополнительными построениями, причем, когда фигура погрешности образована тремя линиями положения, задача определения вероятнейшего места P решается путем проведения противомедиан, а при большем числе линий положения они заменяются двумя эквивалентными линиями, дающими одну точку пересечения¹.

Описание этих построений дано в специальной литературе и поэтому в настоящем учебнике не рассматривается. Заметим только, что они равнозначны обработке результатов наблюдений по способу наименьших квадратов и в связи с этим обеспечивают высокую точность определения величин ΔB и ΔC .

Если же фигура погрешности мала, то геометрическим местом точки P можно считать центр этой фигуры.

Пример. Определение ΔB и ΔC графическим способом.

При выходе судна B в рейс с грузом металла произвели компенсацию сил $B'\lambda H$ и $C'\lambda H$, после чего определили остаточную девиацию, вычислили коэффи-

¹ См.: А. П. Ю щ е н к о. Способ наименьших квадратов. М., «Морской транспорт», 1956.

новится очень чувствительной к воздействию механических сил, возникающих при вибрации и сотрясениях компаса.

3. Если девиация компаса велика, то ее определение нужно выполнять не на восьми, а на значительно большем числе курсов и составлять две таблицы девиации: одну — для компасных, а вторую — для магнитных курсов, так как величины девиации на одноименных $КК$ и $МК$ будут значительно отличаться друг от друга. Кроме того, при составлении таблиц необходимо было бы пользоваться точными формулами, требующими более сложных и длительных вычислений.

Основной принцип уничтожения девиации заключается в компенсации сил, отклоняющих картушку компаса из плоскости магнитного меридиана. Например, уничтожение полукруговой девиации достигается путем компенсации сил $B'\lambda H$ и $C'\lambda H$, а четвертной — компенсацией сил $D'\lambda H$ и $E'\lambda H$.

Для того чтобы компенсировать ту или иную силу, необходимо приложить к картушке новую силу равной величины, но противоположно направленную. Такую силу можно создать с помощью установленных вблизи картушки магнитов или брусков мягкого в магнитном отношении железа. При этом следует руководствоваться следующим, не нуждающимся в пояснениях правилом: силы, действующие на компас от твердого судового железа, нужно компенсировать с помощью магнитов, а силы, возникающие от индуктивного намагничивания корпуса и судовых устройств, — с помощью брусков или шаров мягкого железа.

Направление и величина компенсирующей силы зависят от положения магнитов и брусков относительно диаметральной плоскости судна и расстояния от них до центра магнитной системы компаса. Правильная установка магнитов и брусков как раз и является той задачей, которая решается во время уничтожения девиации тем или другим способом.

Из всех видов девиации наиболее часто приходится уничтожать полукруговую девиацию, так как она, во-первых, превосходит другие девиации по величине, и, во-вторых, подвержена частым и существенным изменениям. Вообще, когда говорят об уничтожении девиации, то прежде всего имеют в виду именно полукруговую девиацию от сил $B'\lambda H$ и $C'\lambda H$.

Каждая из сил, вызывающих полукруговую девиацию, представляет собой сумму двух составляющих:

$$B'\lambda H = cZ + P; \quad C'\lambda H = fZ + Q,$$

причем силы P и Q порождаются твердым судовым железом и имеют постоянные величины и направления, а силы cZ и fZ возникают от мягкого судового железа и величина их изменяется при перемене магнитной широты.

Первые две силы нужно компенсировать магнитами, а две другие — брусками мягкого железа. Однако силы cZ и fZ сравнительно малы, и при плавании в экваториальных и средних широтах их изменениями

можно пренебречь. Поэтому силы $B'\lambda H$ и $C'\lambda H$ компенсируются с помощью магнитов, причем продольная сила $B'\lambda H$ компенсируется продольными магнитами-уничтожителями, а поперечная сила $C'\lambda H$ — поперечными.

Возникающая при этом с изменением широты ошибка имеет существенную величину только в высоких широтах, где для ее устранения принимаются специальные меры (см. гл. VIII).

§ 20. УНИЧТОЖЕНИЕ ПОЛУКРУГОВОЙ ДЕВИАЦИИ НА ЧЕТЫРЕХ ГЛАВНЫХ МАГНИТНЫХ КУРСАХ (СПОСОБ ЭРИ)

Способ Эри является одним из первых внедренных в практику способов уничтожения полукруговой девиации. Он выполняется на главных магнитных курсах $0, 90, 180$ и 270° . Работая на магнитных курсах, наблюдатель имеет возможность непосредственно «видеть» девиацию и, зная, какие силы ее производят, принять меры к их компенсации.

Для теоретического обоснования способа обратимся к точной формуле (31) тангенса девиации:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{A' + B' \sin k + C' \cos k + D' \sin 2k + E' \cos 2k}{1 + B' \cos k - C' \sin k + D' \cos 2k - E' \sin 2k}.$$

Напишем эту формулу для случая, когда судно лежит на магнитном курсе $0^\circ(N)$:

$$\operatorname{tg} \delta_N = \frac{A' + C' + E'}{1 + B' + D'}. \quad (85)$$

Сумма точных коэффициентов $A' + C' + E'$ в числителе формулы (85) характеризует девиацию, которая наблюдается на магнитном курсе 0° .

Умножив числитель и знаменатель правой части выражения (85) на λH , перейдем к силам:

$$\operatorname{tg} \delta_N = \frac{A'\lambda H + E'\lambda H + C'\lambda H}{\lambda H + B'\lambda H + D'\lambda H}. \quad (86)$$

В знаменателе последнего выражения представлены силы, которые действуют в плоскости магнитного меридиана и девиации не производят. Силы же, входящие в числитель, направлены перпендикулярно меридиану и вызывают девиацию δ_N (рис. 51).

Для компенсации силы $C'\lambda H$ введем в нактоуз поперечные магниты-уничтожители. Так как величина девиации от силы $C'\lambda H$ неизвестна, то, перемещая магниты, доведем девиацию δ_N до нуля. Когда δ_N будет полностью уничтожена, числитель выражения (86) обратится в нуль. Это означает, что поперечные магниты будут действовать на катушку силой F , величина которой определится из уравнения

$$A'\lambda H + E'\lambda H + C'\lambda H - F = 0,$$

откуда

$$F = A'\lambda H + E'\lambda H + C'\lambda H. \quad (87)$$

Следовательно, при $\delta_N = 0$ сила F компенсирует все три силы, действующие перпендикулярно магнитному меридиану.

Представим силу F как сумму двух сил f_1 и f_2 , полагая

$$f_1 = C'\lambda H$$

и

$$f_2 = A'\lambda H + E'\lambda H.$$

Тогда можем написать

$$F = f_1 + f_2 = A'\lambda H + E'\lambda H + C'\lambda H. \quad (88)$$

Достигнутая взаимная компенсация сил f_1 и $C'\lambda H$ сохраняется на всех курсах, так как указанные силы при равных величинах все-

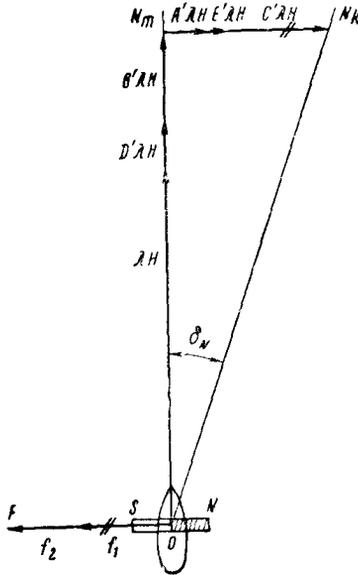


Рис. 51

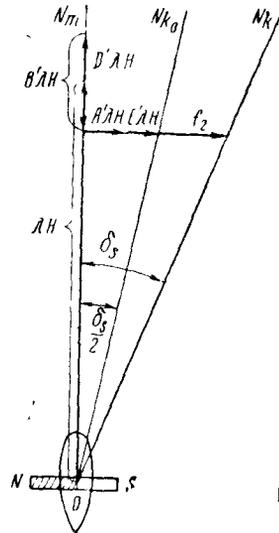


Рис. 52

гда имеют противоположные направления. Этого нельзя сказать о компенсации сил $A'\lambda H$ и $E'\lambda H$ силой f_2 . При изменении курса она неизбежно нарушится в связи с тем, что направление $E'\lambda H$ относительно меридиана меняется по иному закону, чем направление силы f_2 , а сила $A'\lambda H$ на всех курсах перпендикулярна меридиану.

Таким образом, поставленная задача — компенсация силы $C'\lambda H$ — выполнена на курсе 0° с ошибкой, равной по величине силе f_2 .

Приведем судно на обратный магнитный курс 180° (S). При этом направления сил $C'\lambda H$ и F , а также силы $B'\lambda H$ относительно меридиана изменяется на 180° , и формула $\text{tg } \delta$ примет вид:

$$\text{tg } \delta_S = \frac{A'\lambda H + E'\lambda H - C'\lambda H + F}{\lambda H - B'\lambda H + D'\lambda H}. \quad (89)$$

Подставляя в последнее выражение величину силы F , получим:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_s &= \frac{A'\lambda H + E'\lambda H - C'\lambda H + A'\lambda H + E'\lambda H + C'\lambda H}{\lambda H - B'\lambda H + D'\lambda H} = \\ &= \frac{2(A'\lambda H + E'\lambda H)}{\lambda H - B'\lambda H + D'\lambda H} = \frac{A'\lambda H + E'\lambda H + f_2}{\lambda H - B'\lambda H + D'\lambda H}. \end{aligned} \quad (90)$$

Отсюда следует, что на магнитном курсе 180° перпендикулярно меридиану в одном направлении с силами $A'\lambda H$ и $E'\lambda H$ от судового мягкого железа действует сила f_2 от поперечных магнитов-уничто-

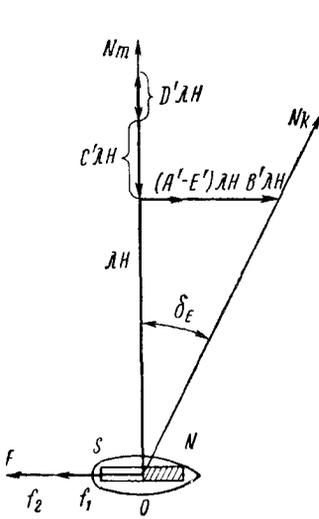


Рис. 53

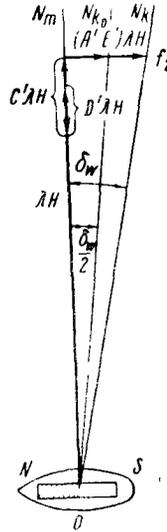


Рис. 54

жителей (рис. 52). Иными словами, на курсе S полностью проявляет себя та ошибка, которая сознательно допущена при компенсации силы $C'\lambda H$ на первом курсе (напомним, что абсолютная величина силы f_2 равна сумме сил $A'\lambda H$ и $E'\lambda H$).

Наблюдаемую на курсе S девиацию можно определить по формуле

$$\operatorname{tg} \delta_s = \frac{A' + E' + \Delta}{1 - B' + D'},$$

где Δ — девиация от силы f_2 .

Силы $A'\lambda H$ и $E'\lambda H$, а значит, и сила f_2 у компасов, установленных в диаметральной плоскости судна, обычно малы. Следовательно, мала и суммарная девиация δ_s . В таком случае можно полагать, что девиация Δ пропорциональна силе f_2 и величина δ_s в два раза больше величины той девиации, которая наблюдалась бы на компасе, если бы перпендикулярно меридиану действовали только силы $A'\lambda H$ и $E'\lambda H$. На этом основании для доведения до нуля силы f_2 переместим попереч-

ные магниты-уничтожители так, чтобы наблюдаемая на курсе девиация уменьшилась в два раза. Тогда магниты будут действовать на компас только силой f_1 , компенсирующей силу $C'\lambda H$.

Компенсация продольной силы $B'\lambda H$ по способу Эри производится на магнитных курсах 90 и 270° , на которых данная сила производит девиацию, близкую к максимальной.

На первом из этих двух курсов, например на курсе 90° , величина девиации выражается формулой

$$\operatorname{tg} \delta_E = \frac{A' - E' + B'}{1 - C' - D'} . \quad (91)$$

Переходя к силам, получим

$$\operatorname{tg} \delta_E = \frac{A' \lambda H - E' \lambda H + B' \lambda H}{\lambda H - C' \lambda H - D' \lambda H} . \quad (92)$$

Наглядное представление о расположении сил на магнитном курсе 90° дано на рис. 53, причем силы $A'\lambda H$ и $E'\lambda H$ заменены их равнодействующей.

Величина силы $B'\lambda H$ неизвестна, поэтому мы вынуждены, вводя в нактоуз продольные магниты-уничтожители, компенсировать все три перпендикулярные меридиану силы $A'\lambda H$, $E'\lambda H$ и $B'\lambda H$. Внешним признаком компенсации этих сил является доведение до нуля девиации δ_E .

При $\delta_E = 0$ сила F' продольных магнитов-уничтожителей будет иметь величину

$$F' = f'_1 + f'_2 = A'\lambda H - E'\lambda H + B'\lambda H,$$

где

$$f'_1 = B'\lambda H \text{ и } f'_2 = A'\lambda H - E'\lambda H.$$

Как и в предыдущем случае, компенсация силы $B'\lambda H$ выполнена с ошибкой, величина которой выражается силой f'_2 . Для устранения ошибки приведем судно на обратный магнитный курс (270°). На этом курсе

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_w &= \frac{A'\lambda H - E'\lambda H - B'\lambda H + F'}{\lambda H + C'\lambda H - D'\lambda H} = \frac{2(A'\lambda H - E'\lambda H)}{\lambda H + C'\lambda H - D'\lambda H} = \\ &= \frac{(A'\lambda H - E'\lambda H) + f'_2}{\lambda H + C'\lambda H - D'\lambda H} . \end{aligned} \quad (93)$$

Из последнего выражения следует, что на магнитном курсе 270° , перпендикулярно меридиану действуют только две силы: равнодействующая судовых сил $A'\lambda H$ и $E'\lambda H$ и равная ей по величине сила f'_2 от продольных магнитов-уничтожителей (рис. 54). Сила f'_2 станет равна нулю, если переместить продольные магниты так, чтобы сумма сил $(A'\lambda H - E'\lambda H) + f'_2$ уменьшилась в два раза.

При малой девиации на магнитном курсе 270° можно считать, что девиация δ_w , производимая суммой сил $(A'\lambda H - E'\lambda H) + f'_2$, в два раза больше девиации от силы $(A'\lambda H - E'\lambda H)$.

Величина δ_w определяется формулой

$$\operatorname{tg} \delta_w = \frac{(A' - E') + \Delta'}{1 + C' - D'}$$

где Δ' — девиация от силы f'_2 .

Уменьшив δ_w наполовину путем перемещения продольных магнитов-уничтожителей, мы доведем до нуля силу f'_2 , и магниты будут действовать на картушку только силой f'_1 , компенсирующей силу $B'\lambda H$.

Практическое выполнение способа Эри

1. Лечь на магнитный курс 0° и с помощью поперечных магнитов-уничтожителей, установленных в нактоузе, довести наблюдаемую девиацию δ_N до нуля.

2. Лечь на обратный курс 180° и, действуя поперечными магнитами, уменьшить наблюдаемую девиацию δ_S в два раза. В результате будет компенсирована сила $C'\lambda H$.

3. Лечь на магнитный курс 90° и, перемещая продольные магниты-уничтожители, довести девиацию δ_E до нуля.

4. Лечь на обратный магнитный курс 270° и с помощью продольных магнитов уменьшить наблюдаемую на этом курсе девиацию δ_w в два раза.

В результате будет компенсирована сила $B'\lambda H$.

Указанный порядок работы не является единственно правильным. Напротив, при практическом выполнении способа Эри может быть принята любая последовательность курсов. Например, можно начать работу с курса 270° , затем лечь на магнитный курс 0° и т. д. Очередность курсов целиком определяется условиями маневрирования судна и расположением створных знаков, используемых для выявления девиации.

Рассмотренный вариант способа Эри основан на предположении, что девиация пропорциональна величине производящей ее силы. Такое предположение вполне справедливо, когда девиация, наблюдаемая на обратных курсах, не превышает определенной величины. Если она велика, то для обеспечения более точных результатов необходимо уменьшать в два раза не девиацию, а перпендикулярную меридиану силу.

Обратимся к рис. 55, показывающему расположение сил на магнитном курсе 180° . При уменьшении в два раза девиации компасный меридиан располагается по биссектрисе угла δ_S , а при таком же уменьшении силы $A'\lambda H + E'\lambda H + f_2$ — по медиане, проведенной на сторону AB . Угол ϵ между медианой и биссектрисой характеризует ошибку, допускаемую при уменьшении в два раза не силы, а девиации. Определим величину угла δ_S , при которой ϵ превышает допустимые пределы $(0^\circ, 2)$.

Углы δ_S и ε связаны между собой следующей зависимостью:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \operatorname{tg}^3 \frac{\delta_S}{2}. \quad (94)$$

Подставим в уравнение (94) численное значение $\varepsilon = 0^\circ,2$ и решим его относительно δ_S :

$$\operatorname{tg} \frac{\delta_S}{2} = \sqrt[3]{\operatorname{tg} 0^\circ,2} = 0,1518.$$

Тогда

$$\delta_S \approx 17^\circ.$$

Следовательно, ошибка ε достигает $0^\circ,2$ при девиациях на обратном магнитном курсе около 17° .

Способ Эри широко применяется при девиационных работах. Этому способствует прежде всего его простота, а также то обстоятельство, что он выполняется без каких бы то ни было вспомогательных приборов и позволяет одновременно уничтожать полукруговую девиацию на нескольких компасах, независимо от их системы.

Способ обеспечивает достаточно точное уничтожение девиации даже при сравнительно больших начальных величинах коэффициентов B' и C' .

Пользуясь теорией способа Эри, легко обосновать один из простейших приемов приближенного уничтожения полукруговой девиации, выполняемый на двух главных взаимно перпендикулярных магнитных курсах.

Пусть, например, судно лежит на магнитном курсе 0° . Наблюдаемая на этом курсе девиация возникает под действием сил $A'\lambda H$, $E'\lambda H$ и $C'\lambda H$:

$$\operatorname{tg} \delta_N = \frac{A'\lambda H + E'\lambda H + C'\lambda H}{\lambda H + B'\lambda H + D'\lambda H}.$$

Если положить $A'\lambda H = E'\lambda H = 0$, то получим

$$\operatorname{tg} \delta_N = \frac{C'\lambda H}{\lambda H + B'\lambda H + D'\lambda H}.$$

Следовательно, пренебрегая силами $A'\lambda H$ и $E'\lambda H$, можем считать, что девиация δ_N обязана своим происхождением только поперечной силе $C'\lambda H$. Если с помощью поперечных магнитов довести δ_N до нуля, то сила $C'\lambda H$ окажется приближенно компенсированной. Наибольшая ошибка в ее компенсации выражается удвоенной суммой сил $A'\lambda H$ и $E'\lambda H$ и будет тем меньше, чем ближе к нулю указанные силы.

Для магнитного курса 90° при условии $A'\lambda H = E'\lambda H = 0$ формула тангенса девиации имеет вид

$$\operatorname{tg} \delta_E = \frac{B'\lambda H}{\lambda H - C'\lambda H - D'\lambda H}.$$

Таким образом, мы вправе полагать, что δ_E производится только силой $B'\lambda H$. Доведя эту девиацию до нуля с помощью продольных магнитов, приблизительно компенсируем силу $B'\lambda H$.

Выполнение данного способа подуничтожения полукруговой девиации допустимо начинать с любого из главных магнитных курсов. Например, лечь на магнитный курс 270° и с помощью продольных магнитов довести δ_w до нуля; затем лечь на магнитный курс 0° и, действуя поперечными магнитами, также довести наблюдаемую девиацию до нуля.

Когда на берегу есть веер створов, состоящий хотя бы из двух-трех створных линий, подуничтожение девиации может быть выполнено на *двух главных компасных курсах*. Поясним этот случай примером.

Пример. Легли на компасный курс 0° ; при пересечении первой створной линии ($ОМП = 210^\circ$) взяли пеленг по компасу ($ОКП = 228^\circ, 5$; $\delta_1 = -18^\circ, 5$) и с помощью поперечных магнитов уничтожили девиацию, подведя под призму пеленгатора отсчет, равный 210° .

Вновь провели судно на компасный курс 0° ; взяли пеленг второй створной линии ($ОМП = 213^\circ, 6$; $ОКП = 206^\circ, 2$; $\delta_2 = +7^\circ, 4$) и, действуя теми же магнитами, подвели под призму пеленгатора отсчет, равный $ОМП = 213^\circ, 6$, т. е. уничтожили девиацию до нуля. В результате подуничтожили силу $C'\lambda H$.

Легли на компасный курс 90° ; при пересечении створной линии определили девиацию ($ОМП = 213^\circ, 6$; $ОКП = 199^\circ, 2$; $\delta_3 = +14^\circ, 4$) и уничтожили ее до нуля с помощью продольных магнитов-уничтожителей.

Вторично привели судно на компасный курс 90° и при пересечении следующей створной линии определили девиацию ($ОМП = 210^\circ$; $ОКП = 216^\circ 3$; $\delta_4 = -6^\circ, 3$); действуя продольными магнитами-уничтожителями, довели девиацию до нуля, для чего подвели под призму пеленгатора отсчет картушки, равный $ОМП (210^\circ)$. В результате подуничтожили силу $B'\lambda H$.

Приведение судна на магнитный курс. Уничтожение и подуничтожение полукруговой девиации методом Эри производятся на магнитных курсах. Приведение судна на нужный магнитный курс может быть выполнено следующими способами:

- по курсовому углу отдаленного предмета или створа;
- последовательным приближением;
- по показаниям гирокомпы.

Чтобы осуществить первый способ, необходимо знать (снять с карты или определить) магнитный пеленг створа или отдаленного предмета. Зная $МП$ и задавшись величиной магнитного курса, нужно вычислить курсовой угол $KУ$, под которым будет усматриваться предмет или створ в тот момент, когда судно будет лежать на требуемом $МК$. Величина $KУ$ определяется по формуле

$$KУ = МП - МК. \quad (95)$$

Формула (95) дает величину $KУ$ в круговом счете, причем если $МП < МК$, то к величине $МП$ следует прибавить 360° .

Остается установить пеленгатор на отсчет азимутального круга котелка, равный вычисленному $KУ$, и повернуть судно так, чтобы отдаленный предмет или створ оказался в визирной плоскости пеленгатора. Судно будет лежать на требуемом магнитном курсе.

Рассмотренный способ применим только во время стоянки судна на бочке и на малых судах, которые можно разворачивать непосредственно у причала или девиационного куста.

Способ последовательных приближений сводится к отысканию такого компасного курса, который соответствует заданному магнитному курсу судна. Он требует определения девиации на нескольких последовательных курсах, и поэтому его целесообразно применять при наличии веера створов.

Рассмотрим данный способ на конкретном примере.

Пример. Требуется лечь на магнитный курс 0° . Приводим судно на компасный курс 0° и при пересечении створной линии определяем девиацию, которая оказалась равной $\delta_1 = +15^\circ,6$. Следовательно, магнитный курс k_1 , на котором лежит судно, равен $15^\circ,6$. Для того чтобы лечь на магнитный курс 0° , поворачиваем судно по компасу влево на $15^\circ,6$, т. е. ложимся на компасный курс $k'_2 = 344^\circ,4$. Следуя этим курсом, пересекаем очередную створную линию и вновь определяем девиацию $\delta_2 = +5^\circ,9$. Таким образом, судно в данный момент находится на магнитном курсе k_2 , равном $350^\circ,3$ ($344^\circ,4 + 5^\circ,9$). Поворачиваем по компасу вправо на $9^\circ,7$. После поворота компасный курс стал равным $k'_3 = 354^\circ,1$. Определив девиацию на этот компасный курс, получили $\delta_3 = +6^\circ,0$. Вычислив $k_3 = 354^\circ,1 + 6^\circ,0 = 360^\circ,1$, видим, что судно лежит на требуемом магнитном курсе 0° . Во избежание ошибок запись результатов наблюдений и вычислений следует вести в форме таблички (см. табл. 3).

Третий способ приведения судна на заданный магнитный курс выполняется путем поворота судна на такой курс по гирокомпасу KK_r , который соответствует заданному магнитному курсу.

Величина KK_r вычисляется по формуле

$$KK_r = k + d - \Delta_r,$$

где k — магнитный курс, на который нужно привести судно;

d — магнитное склонение в данном районе;

Δ_r — поправка гирокомпаса.

§ 21. УНИЧТОЖЕНИЕ ПОЛУКРУГОВОЙ ДЕВИАЦИИ НА ЧЕТЫРЕХ ГЛАВНЫХ КОМПАСНЫХ КУРСАХ С ПОМОЩЬЮ ДЕФЛЕКТОРА (СПОСОБ КОЛОНГА)

Способ Колонга основан на измерении дефлектором равнодействующих сил H' на компасных курсах $0, 90, 180, 270^\circ$.

Величина силы H' в общем случае выражается формулой (см. § 9):

$$H' = \lambda H \cos \delta + A' \lambda H \sin \delta + B' \lambda H \cos k' - C' \lambda H \sin k' + \\ + D' \lambda H \cos (2k' + \delta) - E' \lambda H \sin (2k' + \delta),$$

где k' — компасный курс судна.

Напишем эту формулу для случаев, когда судно лежит на компасных курсах 0 и 180° , полагая при этом $A'\lambda H = E'\lambda H = 0$:

$$\left. \begin{aligned} H'_N &= \lambda H \cos \delta_N + D'\lambda H \cos \delta_N + B'\lambda H \\ H'_S &= \lambda H \cos \delta_S + D'\lambda H \cos \delta_S - B'\lambda H \end{aligned} \right\}. \quad (96)$$

Наглядное представление о действии сил, входящих в выражения (96), дают рис. 56 и 57. Показанные на этих рисунках построения выполнены в предположении, что все приложенные к картушке компаса судовые магнитные силы положительны.

Вернемся к уравнениям (96). Сомножители δ_N и δ_S равны по абсолютной величине. Это вытекает из точной формулы (32) синуса девиации:

$$\sin \delta = A' \cos \delta + B' \sin k' + C' \cos k' + D' \sin (2k' + \delta) + E' \cos (2k' + \delta).$$

Полагая в ней $A' = E' = 0$, для компасных курсов 0 и 180° получим:

$$\begin{aligned} \sin \delta_N &= C' + D' \sin \delta_N; \\ \sin \delta_S &= -C' + D' \sin \delta_S. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\sin \delta_N = \frac{C'}{1 - D'}$$

и

$$\sin \delta_S = \frac{-C'}{1 - D'},$$

т. е.

$$|\delta_N| = |\delta_S| = |\delta|.$$

При этом условии найдем среднее значение сил H'_N и H'_S :

$$H'_{cp} = \frac{H'_N + H'_S}{2} = \lambda H \cos \delta + D' \lambda H \cos \delta = \lambda (1 + D') H \cos \delta.$$

Как видим, в величину силы H'_{cp} не входит сила $B'\lambda H$. В то же время среднее арифметическое из сил H'_N и H'_S численно равно сумме проекций сил λH и $D'\lambda H$ на плоскость компасного меридиана, которые должны остаться на компасе после уничтожения полукруговой девиации. На этом и основана компенсация силы $B'\lambda H$ по способу Колонга.

Физический смысл способа заключается в следующем. Если после измерений сил H'_N и H'_S установить измерительный магнит дефлектора на отсчет $H'_{cp} = \lambda (1 + D') H \cos \delta$ и совместить ось магнита с плоскостью компасного меридиана, обратив северный полюс магнита к N_K , то сила F измерительного магнита компенсирует судовую силу $\lambda (1 + D') H \cos \delta$. Тогда картушкой будут управлять только две силы: сила $B'\lambda H$ и сила f вспомогательного магнита дефлектора. Под влия-

нием этих сил картушка установится под некоторым углом α к плоскости меридиана, причем чем меньше $B'\lambda H$, тем больше угол α . При $B'\lambda H = 0$ картушка будет находиться под действием только вспомогательного магнита и угол α будет равен 90° . Отсюда следует, что для компенсации силы $B'\lambda H$ надо, установив измерительный магнит дефлектора на отсчет $H'_{ср}$, ввести в нактоуз продольные магниты-уничтожители и перемещать их до тех пор, пока картушка не отклонится из меридиана на 90° , т. е. пока под призмой пеленгатора не окажется отсчет 270° (90°) картушки.

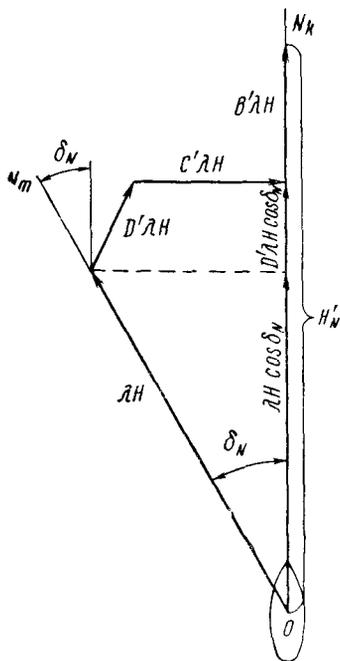


Рис 56

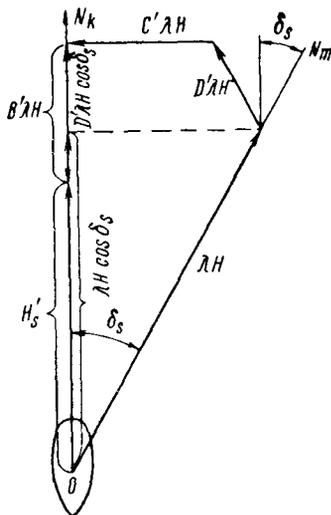


Рис. 57

Перейдем к обоснованию компенсации поперечной силы $C'\lambda H$ на компасных курсах 90 и 270° .

На этих компасных курсах при $A'\lambda H = E'\lambda H = 0$ величины равнодействующих сил H' выражаются следующими уравнениями:

$$H'_E = \lambda H \cos \delta_E - D' \lambda H \cos \delta_E - C' \lambda H;$$

$$H'_W = \lambda H \cos \delta_W - D' \lambda H \cos \delta_W + C' \lambda H.$$

Соответствующее данным уравнениям расположение сил показано на рис. 58 и 59.

Силы H'_E и H'_W могут быть измерены дефлектором.

Из формулы (32) синуса девиации при $A' = E' = 0$ получим

$$\sin \delta_E = \frac{B'}{1 + D'} \text{ и } \sin \delta_W = \frac{-B'}{1 + D'},$$

т. е.

$$|\delta_E| = |\delta_W| = |\delta|.$$

Поэтому

$$H''_{\text{ср}} = \frac{H'_E + H'_W}{2} = \lambda H \cos \delta - D' \lambda H \cos \delta = \lambda (1 - D') H \cos \delta.$$

Если работа на курсах 90° и 270° производится после компенсации силы $B' \lambda H$, то $\delta_E = \delta_W = 0$. Тогда сила $H''_{\text{ср}}$ будет иметь величину

$$H''_{\text{ср}} = \frac{H'_E + H'_W}{2} = \lambda (1 - D') H.$$

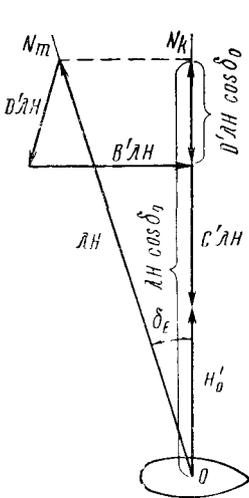


Рис. 58

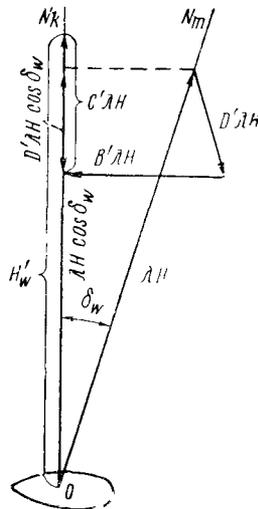


Рис. 59

Аналогично предыдущему величина $H''_{\text{ср}}$ численно равна сумме тех судовых сил, которые должны действовать на картушку после уничтожения полукруговой девиации, и не содержит силы $C' \lambda H$, подлежащей компенсации.

Установив измерительный магнит дефлектора на отсчет, равный $H''_{\text{ср}}$, получим возможность компенсировать силу $C' \lambda H$ с помощью поперечных магнитов-уничтожителей. Внешним признаком компенсации этой силы, как и при работе на курсах 0° и 180° , является отклонение картушки из плоскости компасного меридиана на 90° .

Практическое выполнение способа Колонга

1. Лечь на компасный курс 0° (180°); установить пеленгатор в плоскости компасного меридиана и измерить дефлектором горизонтальную силу H'_N (H'_S).

2. Лечь на компасный курс 180° (0°) и измерить дефлектором горизонтальную силу $H'_S(H'_N)$.

3. Не снимая дефлектора, установить его измерительный магнит на отсчет, равный $H'_{cp} = \frac{H'_N + H'_S}{2}$, и, действуя продольными магнитами в нактоузе, подвести под призму пеленгатора отсчет 270° картушки.

В результате будет компенсирована сила $B'\lambda H$.

4. Лечь на компасный курс 90° (270°) и измерить дефлектором силу $H'_E(H'_W)$.

5. Лечь на компасный курс 270° (90°) и измерить дефлектором силу $H'_W(H'_E)$.

6. Переместить измерительный магнит дефлектора на отсчет, равный $H''_{cp} = \frac{H'_E + H'_W}{2}$, и, действуя поперечными магнитами-уничтожителями, подвести под призму пеленгатора отсчет 270° картушки.

Будет компенсирована сила $C'\lambda H$.

Выполнение способа можно начинать не только с курсов 0 (180°), но и с курсов 90 (270°).

На большинстве судов магнитный компас устанавливается так, что крышка его нактоуза оказывается обращенной к корме судна. При таком положении компаса уничтожение полукруговой девиации от продольной силы $B'\lambda H$ целесообразно начинать с курса 180° . Тогда на обратном компасном курсе призма пеленгатора будет обращена к корме судна, и во время компенсации силы $B'\lambda H$ наблюдатель будет иметь возможность, перемещая магниты-уничтожители, непрерывно наблюдать отсчет картушки под призмой. Если крышка нактоуза обращена к носу судна, то для удобства работы компенсацию силы $B'\lambda H$ предпочтительнее начинать с курса 0° .

Приведенные здесь рекомендации в отношении начальных курсов даны применительно к обычной методике измерения горизонтальных сил, когда установка пеленгатора в плоскости компасного меридиана выполняется по отсчету 180° картушки компаса. Однако горизонтальные силы можно измерять, устанавливая пеленгатор в меридиане и по отсчету 0° картушки. (Понятно, что положение дефлектора относительно плоскости компасного меридиана в обоих случаях должно быть одинаковым.) Поэтому наблюдатель, в совершенстве владеющий методикой измерения сил с помощью дефлектора, может не придерживаться этих рекомендаций, а начинать работу по компенсации силы $B'\lambda H$ с того компасного курса, какой является наиболее приемлемым в условиях данного рейда.

Уничтожение полукруговой девиации с помощью дефлектора удобно в том отношении, что оно производится на компасных курсах и в процессе работы не требуется пеленговать береговые предметы. Поэтому способ Колонга можно применять в открытом море, вне видимости берегов.

По точности уничтожения полукруговой девиации этот способ вполне приемлем для практики, хотя он несколько уступает способу Эри.

Причина менее точного уничтожения девиации с помощью дефлектора заключается главным образом в том, что измерительный магнит прибора индуцирует магнетизм в мягком железе нактоуза компаса и к картушке оказывается приложенной дополнительная сила, увеличивающая или уменьшающая измеряемую силу H' .

На точности способа также отрицательно сказываются случайные ошибки измерений сил, ошибка в доведении равнодействующей силы H' до среднего значения и ошибки в курсе.

Наконец, нельзя не отметить, что при наличии на компасе постоянной и четвертной девиации (A и E) способ имеет методическую погрешность, так как в этом случае, строго говоря, нужно доводить силы H' на курсах 0 (180°) и 90 (270°) не до среднего значения, а до другой величины.

В развитие идеи способа Колонга инженер-судоводитель П. А. Нечаев предложил новый практический прием уничтожения полукруговой девиации, который позволяет выполнять эту работу в более короткий срок, но для этого требуется, чтобы девиационный прибор нактоуза имел кубичную шкалу для оценки величины магнитных сил, действующих на картушку от магнитов-уничтожителей.

Для рассмотрения этого приема напомним, что величины горизонтальных сил H'_N и H'_S при $A' = E' = 0$ выражаются уравнениями:

$$H'_N = \lambda H \cos \delta_N + D' \lambda H \cos \delta_N + B' \lambda H;$$

$$H'_S = \lambda H \cos \delta_S + D' \lambda H \cos \delta_S - B' \lambda H,$$

где

$$|\delta_N| = |\delta_S|.$$

Если вычесть из первого уравнения второе, то получим

$$H'_N - H'_S = 2B' \lambda H.$$

Последнее выражение показывает, что равнодействующая H'_N на компасном курсе 0° отличается от такой же силы на курсе 180° на величину, равную удвоенному значению силы $B' \lambda H$. Отсюда заключаем, что если после измерения силы H'_N на курсе 0° лечь на компасный курс 180° , а измерительный магнит сохранить на отсчете, равном известной величине H'_N , то на картушку компаса будут действовать две силы: сила, равная $2B' \lambda H$, и сила f вспомогательного магнита дефлектора. Первая из них направлена в плоскости компасного меридиана, а вторая — перпендикулярно ей. В результате картушка своею осью NS установится по равнодействующей F указанных сил (рис. 60).

Находящиеся в нактоузе компаса продольные магниты-уничтожители также действуют на картушку некоторой продольной силой,

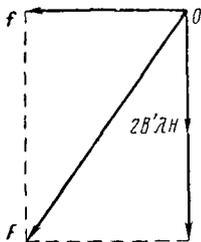


Рис. 60

но ее величина целиком входит в силу $V'\lambda H$. Заметив отсчет каретки с магнитами по шкале девиационного прибора, переместим ее так, чтобы катушка отклонилась от меридиана на 90° . Тогда магниты будут действовать на компас силой, равной — $2V'\lambda H$.

Для уменьшения этой силы в два раза заметим новое положение каретки по шкале девиационного прибора, а затем установим каретку с магнитами на средний из двух взятых отсчетов. После выполнения этих операций продольные

магниты будут компенсировать силу $V'\lambda H$.

Аналогично компенсируется и сила $C'\lambda H$ на компасных курсах 90 и 270° .

Практическое выполнение приема Нечаева:

1. Лечь на компасный курс 0° и измерить дефлектором горизонтальную силу H'_N .

2. Лечь на компасный курс 180° ; установить пеленгатор на отсчет 180° по азимутальному кругу и поставить на чашку пеленгатора дефлектор, измерительный магнит которого установлен на отсчет, равный H'_N .

3. Заметить положение каретки с продольными магнитами-уничтожителями по шкале девиационного прибора; перемещая каретку, подвести под призму пеленгатора отсчет 270° катушки и взять новый отсчет каретки по шкале девиационного прибора; установить каретку с продольными магнитами на средний из взятых отсчетов.

В результате будет компенсирована сила $V'\lambda H$.

4. Лечь на компасный курс 90 и измерить дефлектором силу H'_E .

5. Лечь на компасный курс 270° ; установить пеленгатор на отсчет 90° по азимутальному кругу и поставить на чашку пеленгатора дефлектор, измерительный магнит которого должен находиться на отсчете, равном величине силы H'_E .

6. Заметить положение каретки с поперечными магнитами-уничтожителями по шкале девиационного прибора; перемещая каретку, подвести под призму пеленгатора отсчет 270° катушки, после чего заметить новое положение каретки по шкале девиационного прибора; установить каретку с поперечными магнитами-уничтожителями на средний из двух взятых отсчетов. Будет компенсирована сила $C'\lambda H$.

При выполнении изложенного приема в два раза уменьшается количество измерений сил дефлектором, в результате чего весь процесс уничтожения полукруговой девиации требует меньше времени, чем способ Колонга.

Рассмотрим теперь способ приближенного уничтожения полукруговой девиации с помощью дефлектора. Как было установлено при изучении способа Колонга, для точной компенсации сил $V'\lambda H$ и $C'\lambda H$ необходимо знать величину $\lambda(1 + D')H \cos \delta_1$ и $\lambda(1 - D')H \cos \delta_2$. Их значения определяются по результатам измерений равнодействующих сил H' на главных компасных курсах.

Для подуничтожения полукруговой девиации эти величины определяют приближенно, не прибегая к измерениям сил на судне. Действительно, если пренебречь величиной D' и принять $\cos \delta_1 = \cos \delta_2 = 1$, то получим следующие приближенные равенства:

$$\lambda(1 + D')H \cos \delta_1 \approx \lambda H$$

и

$$\lambda(1 - D')H \cos \delta_2 \approx \lambda H.$$

Величина λH представляет собой произведение измеренной на берегу составляющей H земного магнетизма и коэффициента λ . В тех случаях, когда величина коэффициента λ неизвестна, следует принять ее равной 0,8—0,9 для главного компаса и 0,6—0,8 для путевого.

Более надежных результатов достигают, когда вместо величины λH пользуются произведениями $\lambda(1 + D')H$ и $\lambda(1 - D')H$, выбрав коэффициент D' из таблицы девиации и переведя его в радианную меру.

Практически для выполнения способа необходимо следующее.

1. Измерить на берегу горизонтальную составляющую H земного магнетизма и вычислить величину λH [или $\lambda(1 + D')H$ и $\lambda(1 - D')H$].

2. Лечь на компасный курс 0° ; установить пеленгатор, а затем и дефлектор в плоскости компасного меридиана; поставить измерительный магнит дефлектора на отсчет, равный λH или $\lambda(1 + D')H$ по шкале горизонтальных сил; с помощью продольных магнитов-уничтожителей подвести под призму пеленгатора отсчет 270° картушки.

В результате будет приближенно компенсирована сила $B'\lambda H$.

3. Лечь на компасный курс 90° ; установить пеленгатор и дефлектор в плоскости компасного меридиана; поставить магнит дефлектора на отсчет, равный λH или $\lambda(1 - D')H$, и с помощью поперечных магнитов-уничтожителей подвести под призму пеленгатора отсчет 270° картушки.

Будет приближенно компенсирована сила $C'\lambda H$.

Данный способ подуничтожения полукруговой девиации с одинаковым успехом можно выполнять и на других главных компасных курсах, причем очередность курсов при работе безразлична.

§ 22. УНИЧТОЖЕНИЕ ПОЛУКРУГОВОЙ ДЕВИАЦИИ НА ДВУХ ГЛАВНЫХ ОБРАТНЫХ МАГНИТНЫХ КУРСАХ

Способ двух главных обратных магнитных курсов E — W или N — S является сочетанием двух основных методов уничтожения полукруговой девиации — метода Эри и метода Колонга. Например, работая на магнитных курсах E и W, продольную силу $B'\lambda H$ компенсируют по наблюдениям девиации, т. е. методом Эри, а поперечную $C'\lambda H$ — по результатам измерений сил H'_E и H'_W с помощью дефлектора, т. е. методом Колонга.

Если же местные условия (протяженность рейда, глубины и т. д.) вынуждают производить уничтожение на магнитных курсах N и S, то по наблюдениям девиации компенсируется поперечная сила $C'\lambda H$, а по измерениям сил — продольная сила $B'\lambda H$.

Рассмотрим в кратком виде теоретические основания уничтожения полукруговой девиации на главных магнитных курсах E и W .

Пусть судно лежит на магнитном курсе 90° .

Возьмем по компасу пеленг створа или отдаленного предмета и, сопоставив его с известным магнитным пеленгом, определим девиацию δ_E . Ее величина характеризуется выражением

$$\operatorname{tg} \delta_E = \frac{A' - E' + B'}{1 - D' - C'} = \frac{A'\lambda H - E'\lambda H + B'\lambda H}{\lambda H - D'\lambda H - C'\lambda H}.$$

Введем в нактоуз продольные магниты-уничтожители и доведем с их помощью δ_E до нуля. Тогда магниты будут действовать на картушку компаса силой

$$F = f_1 + f_2 = (A'\lambda H - E'\lambda H) + B'\lambda H,$$

где

$$f_1 = B'\lambda H; \quad f_2 = A'\lambda H - E'\lambda H.$$

Таким образом, при $\delta_E = 0$ сила F продольных магнитов-уничтожителей компенсирует, наряду с силой $B'\lambda H$, производящей полукруговую девиацию, силы $A'\lambda H$ и $E'\lambda H$ от мягкого судового железа.

Отсюда делаем вывод, что компенсация силы $B'\lambda H$ выполнена на курсе 90° с ошибкой, равной величине силы f_2 .

Желая на этом же курсе получить исходные данные для компенсации силы $C'\lambda H$, измерим дефлектором поперечную проекцию Y'_E :

$$Y'_E = H'_E = \lambda H - D'\lambda H - C'\lambda H.$$

После этого приведем судно на магнитный курс 270° и прежде всего сведем к нулю силу f_2 . Для этого определим девиацию δ_W :

$$\operatorname{tg} \delta_W = \frac{A' - E' + \Delta}{1 - D' + C'}$$

или

$$\operatorname{tg} \delta_W = \frac{A'\lambda H - E'\lambda H + f_2}{\lambda H - D'\lambda H + C'\lambda H},$$

где Δ — девиация от силы f_2 .

Считая, что девиация пропорциональна производящей ее силе, уменьшим δ_W в два раза с помощью продольных магнитов. Тогда сила f_2 окажется уничтоженной и продольные магниты-уничтожители будут действовать на компас только силой f_1 , компенсирующей судовую силу $B'\lambda H$.

Теперь измерим дефлектором проекцию равнодействующей силы H'_W на судовую ось y (поперечную проекцию Y'_W):

$$Y'_W = \lambda H - D'\lambda H + C'\lambda H.$$

Среднее арифметическое из измеренных проекций Y'_W и Y'_E имеет величину:

$$Y'_{cp} = \frac{Y'_E + Y'_W}{2} = \lambda H - D'\lambda H = \lambda(1 - D')H.$$

Доведя проекцию Y'_W (или Y'_E) до величины $\lambda(1 - D')H$ с помощью поперечных магнитов-уничтожителей, компенсируем силу $C'\lambda H$.

Для лучшего уяснения теории способа двух главных обратных магнитных курсов учащемуся предлагается самостоятельно обосновать компенсацию сил $B'\lambda H$ и $C'\lambda H$ на магнитных курсах N и S, воспользовавшись чертежами, приведенными при рассмотрении способа Эри.

Отметим, что теоретическое обоснование способа двух главных обратных магнитных курсов может быть получено как частный случай способа двух любых магнитных курсов.

Практическое выполнение способа E — W магнитных

1. Лечь на магнитный курс 90° (270°); с помощью продольных магнитов-уничтожителей довести δ_E (δ_W) до нуля.

2. Установив пеленгатор на отсчет 270° (90°) по азимутальному кругу, измерить дефлектором проекцию Y'_E (Y'_W).

3. Лечь на магнитный курс 270° (90°) и, действуя продольными магнитами-уничтожителями, уменьшить δ_W (δ_E) в два раза. Компенсирована сила $B'\lambda H$.

4. Установить пеленгатор на отсчет 90° (270°) по азимутальному кругу и измерить дефлектором поперечную проекцию Y'_W (Y'_E).

5. Переместить измерительный магнит дефлектора на отсчет, равный $Y'_{cp} = \frac{Y'_E + Y'_W}{2}$, и с помощью поперечных магнитов-уничтожителей подвести под призму пеленгатора отсчет 270° картушки. Компенсирована сила $C'\lambda H$.

Способ двух главных обратных магнитных курсов позволяет уничтожать полукруговую девиацию одновременно на всех имеющихся на судне магнитных компасах.

§ 23. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА λ

Коэффициент λ , характеризующий магнитные условия работы компаса на судне, входит в качестве множителя в силу λH . Непосредственное измерение этой силы невозможно, так как кроме нее на компас всегда действуют силы $A'\lambda H$, $B'\lambda H$, $C'\lambda H$ и т. д. и измерения дают величину равнодействующей H' всех приложенных к картушке сил.

Однако значение λH можно получить как среднее арифметическое из величин H' , измеренных на восьми главных и четвертных компасных курсах.

Действительно, если положить $A'\lambda H = 0$, то при малой величине девиации выражение для H' представится в следующем виде:

$$H' = \lambda H + B'\lambda H \cos k' - C'\lambda H \sin k' + D'\lambda H \cos 2k' - E'\lambda H \sin 2k'.$$

В частных случаях, когда измерения H' производятся на главных и четвертных компасных курсах, получим:

$$\begin{aligned} H'_N &= \lambda H + B'\lambda H + D'\lambda H; \\ H'_{NE} &= \lambda H + B'\lambda H \cos 45^\circ - C'\lambda H \sin 45^\circ - E'\lambda H; \\ H'_E &= \lambda H - C'\lambda H - D'\lambda H; \\ &\dots \dots \dots \\ H'_{NW} &= \lambda H + B'\lambda H \cos 315^\circ + C'\lambda H \sin 315^\circ + E'\lambda H, \end{aligned}$$

откуда

$$H'_{\text{ср}} = \frac{\sum_1^8 H'}{8} = \lambda H.$$

Разделив $H'_{\text{ср}}$ на величину горизонтальной составляющей H земного магнетизма, получим искомый коэффициент λ :

$$\lambda = \frac{\sum_1^8 H'}{8H}. \quad (97)$$

Итак, для определения коэффициента λ нужно измерить составляющую H земного магнетизма и равнодействующие силы H' на восьми главных и четвертных компасных курсах (после уничтожения девиации), а затем произвести вычисления по формуле (97).

Иногда ограничиваются измерениями сил H' только на главных компасных курсах и вычисляют λ по формуле

$$\lambda = \frac{\sum_1^4 H'}{4H}. \quad (98)$$

Величину коэффициента λ следует записывать в таблицу девиации. Туда же записывают числовое значение величины $\lambda(1 - D')$, которое определяется по формуле

$$\lambda(1 - D') = \frac{H'_E + H'_W}{2H}.$$

КРЕНОВАЯ ДЕВИАЦИЯ

§ 24. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ КРЕНОВОЙ ДЕВИАЦИИ

В главе II, где рассматривается общая теория девиации, все выводы даны применительно к судну, находящемуся в прямом положении, т. е. не имеющему ни крена, ни дифферента. Между тем известно, что иногда на судах наблюдается постоянный крен или дифферент или суда подвергаются качке, т. е. переменному поперечному или продольному крену. Понятно, что в этих случаях и условия намагничивания судна в магнитном поле Земли, и влияние судового магнетизма на магнитный компас будут иными, отличающимися от тех, которые были рассмотрены ранее.

Изменение этих условий неизбежно приведет к изменению девиации магнитного компаса, установленного на судне, или, как говорят, к появлению креновой девиации, которая, наложившись на известные уже виды девиации (постоянную, полукруговую и четвертную), искажает их общий характер.

Вопрос о креновой девиации — один из самых сложных вопросов теории девиации магнитного компаса. Эта задача в общем виде еще не решена, т. е. еще не найдено методов, пользуясь которыми можно было бы уничтожить все виды креновой девиации, независимо от углов крена судна.

Ввиду сложности задачи многие авторы решают ее для ограниченных углов крена, при которых косинус угла принимается равным единице, а синус — дуге, стягивающей малый угол. Но по характеру самой задачи она представляет особый интерес именно при больших углах крена, когда можно ожидать, что креновая девиация проявит себя максимальным образом.

Поэтому выберем другой путь решения: не станем вводить ограничения в углы крена, а сделаем допущение, что у главного компаса, установленного на верхнем мостике в диаметральной плоскости судна, кроме параметров b , d , f и h , которые могут быть приняты равными нулю, параметр g мал и также принимается за нуль. Как видно из анализа уравнений Пуассона, такое допущение для главного компаса возможно.

В дальнейшем же, когда речь будет идти о методах уничтожения креновой девиации, от этого требования можно будет отказаться и обоснование методов можно дать, не вводя этого ограничения, т. е. не считая, что параметр g равен нулю.

Итак, рассмотрим влияние крена судна на изменение девиации главного магнитного компаса. Начнем с поперечного крена, представляющего наибольший интерес, поскольку на судах он бывает гораздо больше по величине крена продольного.

Произведем замену

$$\sin^2 i = \frac{1}{2} (1 - \cos 2i); \quad \cos^2 i = \frac{1}{2} (1 + \cos 2i); \quad \sin i \cos i = \frac{1}{2} \sin 2i$$

и сгруппируем члены по синусам и косинусам дуг, кратных углам крена:

$$Y'_i = \left(1 + \frac{e+k}{2}\right) Y - R \sin i + Q \cos i + \frac{e-k}{2} Z \sin 2i + \frac{e-k}{2} Y \cos 2i. \quad (101)$$

Введем обозначения:

$$\left(1 + \frac{e+k}{2}\right) Y = N; \quad \frac{e-k}{2} Z = S; \quad \frac{e-k}{2} Y = T,$$

тогда окончательно получим

$$Y'_i = N - R \sin i + Q \cos i + S \sin 2i + T \cos 2i. \quad (102)$$

Этот тригонометрический многочлен выражает собой поперечную составляющую напряженности суммарного магнитного поля (земного и судового), действующую в *плоскости картушки* компаса при крене судна.

Как видим, поперечная составляющая, кроме того, что она зависит от курса судна и магнитной широты района плавания, является сложной периодической функцией угла крена.

На рис. 63 представлено изменение этой составляющей в зависимости от крена судна. Кривая составлена для случая, когда полукруговая девиация у компаса уничтожена ($Q = 0$) и судно лежит на магнитных курсах N или S ($Y = 0$).

В этом случае формула (102) преобразуется так:

$$Y'_i = -R \sin i + S \sin 2i.$$

Из рисунка видно, что при отсутствии крена ($i = 0$) поперечная составляющая на этих курсах равна нулю. Следовательно, отклоняющего действия на стрелки компаса нет и девиации не наблюдается (она уничтожена).

По мере накренения судна на правый или левый борт в плоскости картушки появляется поперечная составляющая напряженности магнитного поля, отклоняющая картушку компаса, вызывая девиацию. Это отклонение особенно заметно должно проявляться на компасных курсах N и S, так как в этих случаях поперечная составляющая действует перпендикулярно компасным стрелкам.

На двух же других главных румбах — E или W — поперечная составляющая совпадает с магнитной осью картушки и поэтому отклоняющего действия на стрелки компаса не оказывает. В данном случае, как показано на рис. 63, при крене на правый борт поперечная состав-

ляющая, возникшая от этого крена, действует к левому борту, так как при расчете принято $R > S > 0$, а при крене на левый борт — к правому.

Если судно подвергается качке, попеременно переваливаясь с одного борта на другой, то картушка компаса под воздействием переменной составляющей напряженности магнитного поля, действующей то в правый, то в левый борт, начнет «ходить» вправо и влево так, что по компасу станет трудно удерживать судно на заданном курсе. Чтобы устранить это «хождение», нужно создать у компаса такие магнитные условия, при которых поперечная составляющая Y' при крене судна не изменялась бы.

Искусственное создание таких условий носит название *уничтожения креновой девиации*.

Прежде чем перейти к вопросу об уничтожении креновой девиации, скажем несколько слов об изменении магнитного поля судна при продольном крене.

Чтобы показать, что продольная составляющая судового магнитного поля при продольном крене судна изменяется в общем по такому же закону, как и поперечная составляющая при поперечном крене, воспользуемся следующей простой аналогией: напишем первое и третье уравнения Пуассона (25) для главного компаса и, чтобы не нарушить аналогии с уравнениями (99), примем параметр c равным нулю:

$$X' = (1 + a)X + P, \quad Z' = (1 + k)Z + R.$$

Разница между этими уравнениями и уравнениями вида (99) состоит в том, что в эти уравнения вместо параметра e входит параметр a , вместо поперечной проекции Q — продольная P , а составляющая Y' заменена X .

Поэтому, если повторим весь вывод данного параграфа применительно к продольному крену судна, то в результате получим выражение, подобное (102), т. е.:

$$X'_i = N_1 - R \sin i + P \cos i + S_1 \sin 2i + T_1 \cos 2i,$$

где

$$\left(1 + \frac{a+k}{2}\right) X = N_1; \quad \frac{a-k}{2} Z = S_1; \quad \frac{a-k}{2} X = T_1.$$

Этот многочлен, так же как и (102), выражает собой составляющую напряженности суммарного магнитного поля, действующую в плоскости картушки. Но это действие проявляется по продольной судовой оси и возникает при продольном крене судна.

Если судно испытывает продольную или так называемую килевую качку, то под действием меняющейся продольной составляющей кар-

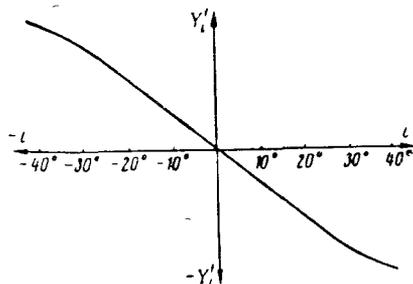


Рис. 63

тушка компаса также начнет «ходить» вправо и влево, как и при боковой качке, и это хождение должно особенно проявляться на курсах E и W.

Но сам по себе продольный крен на судах не достигает такой большой величины, как поперечный. Поэтому главную роль в нормальной эксплуатации компаса играет креновая дивиация от поперечного крена; а уже потом — от продольного.

§ 25. ОБЩИЕ УСЛОВИЯ УНИЧТОЖЕНИЯ КРЕНОВОЙ ДЕВИАЦИИ

Условия уничтожения креновой дивиации от поперечного крена могут быть сформулированы так: *поперечная составляющая напряженности магнитного поля, действующая в плоскости картушки при поперечном крене судна, не должна зависеть от угла крена.* Другими словами, она должна быть равна поперечной составляющей, выраженной вторым уравнением Пуассона для прямого положения судна:

$$Y'_i = Y'.$$

Развернем это равенство в соответствии с формулами (99) и (101):

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{e+k}{2}\right) Y - R \sin i + Q \cos i + \frac{e-k}{2} Z \sin 2i + \\ + \frac{e-k}{2} Y \cos 2i = (1+e)Y + Q. \end{aligned} \quad (103)$$

Подставив в это выражение $i = 0$, можем убедиться, что в этом случае обе его части оказываются тождественно равными друг другу. Но этот частный случай решения в данный момент нас не интересует, так как в поставленной задаче требуется найти решение уравнения (103) для любого значения угла i , отличного от нуля.

Положим $k = e$. Тогда, подставив это условие в уравнение (103), получим

$$(1+e)Y - R \sin i + Q \cos i = (1+e)Y + Q$$

или после сокращения:

$$-R \sin i + Q \cos i = Q.$$

Как видно, принятого условия оказалось недостаточно: тождество по-прежнему остается возможным при $i = 0$. Следовательно, нужно ввести дополнительное условие.

Вспомним, что если у компаса тщательно уничтожена полукруговая дивиация, производимая силой $C'LN$, то $Q = 0$. Тогда последнее равенство обращается в следующее:

$$R \sin i = 0.$$

Чтобы это условие было соблюдено при всех значениях i , нужно иметь

$$R = 0.$$

Итак, для уничтожения креновой девиации от поперечного крена требуется, чтобы действие постоянного судового магнетизма на компас по поперечной и вертикальной судовым осям было сведено к нулю:

$$Q = 0; \quad R = 0.$$

Кроме того, требуется, чтобы мягкое в магнитном отношении судовое железо, окружающее данный компас, характеризовалось параметрами

$$k = e.$$

Если обратиться к креновой девиации от продольного крена, то, рассуждая аналогичным образом, можно прийти к заключению, что для ее уничтожения требуется, чтобы постоянный судовый магнетизм не оказывал своего воздействия на компас по продольной и вертикальной судовым осям:

$$P = 0; \quad R = 0$$

и параметры мягкого в магнитном отношении судового железа определялись бы равенством

$$k = a.$$

Следовательно, для одновременного уничтожения креновой девиации как от поперечного, так и от продольного крена требуется соблюдение условий:

$$P = Q = R = 0, \quad a = e = k.$$

Эти условия могут быть частично выполнены, если у компаса уничтожены полукруговая и четвертная девиации.

При уничтожении полукруговой девиации можно полагать, что $P = 0$ и $Q = 0$, а при уничтожении четвертной $D' = \frac{a - e}{2\lambda} = 0$ или $a = e$.

Уничтожение же собственно креновой девиации заключается в компенсации, т. е. в доведении до нуля вертикальной составляющей постоянного судового магнетизма ($R = 0$) и в создании условия $k = e$.

Важно подчеркнуть, что компенсация сил $B'\lambda H$, $C'\lambda H$ и $D'\lambda H$, т. е. хорошее уничтожение полукруговой и четвертной девиации, является неперменным требованием надежного уничтожения креновой девиации¹. Нарушение этого требования неизбежно приводит к появлению у компаса девиации от крена или дифферента.

Полученные в этом параграфе выводы являются справедливыми в том случае, если остаются в силе сделанные ранее допущения о равенстве нулю некоторых параметров уравнений Пуассона. Опыт показывает, что эти допущения в большинстве случаев вполне оправданы и основанные на них методы уничтожения креновой девиации по своей точности удовлетворяют требованиям практики.

¹ Силы $A'\lambda H$ и $E'\lambda H$ не рассматриваются из-за их малости у главного компаса.

Если же отказаться от ранее сделанных допущений и вывод креновой девиации произвести, не ограничивая ни углов крена, ни величин параметров, то можно показать, что при крене судна изменяются все без исключения коэффициенты девиации.

Обозначим коэффициенты девиации при крене судна буквами: $\lambda_i, A_i, B_i, C_i, D_i, E_i$. Тогда, пользуясь принятыми обозначениями, можем написать:

$$\begin{aligned}\lambda_i &= \lambda - \frac{f+h}{2} \cos i \sin i - \frac{e-k}{2} \sin^2 i; \\ A_i &= \frac{\lambda}{\lambda_i} \left(A' \cos i + \frac{c-g}{2\lambda} \sin i \right); \\ B_i &= \frac{\lambda}{\lambda_i} \left[B' + \left(\frac{b}{\lambda} \sin i - 2 \frac{c}{\lambda} \sin^2 \frac{i}{2} \right) \operatorname{tg} I \right]; \\ C_i &= \frac{\lambda}{\lambda_i} \left[C' + \left(\frac{e-k}{\lambda} \cos i \sin i - \frac{f+h}{\lambda} \sin^2 i \right) \operatorname{tg} I - \right. \\ &\quad \left. - 2 \frac{Q}{\lambda H} \sin^2 \frac{i}{2} - \frac{B}{\lambda H} \sin i \right]; \\ D_i &= \frac{\lambda}{\lambda_i} \left(D' + \frac{f+h}{2\lambda} \cos i \sin i + \frac{e-k}{2\lambda} \sin^2 i \right); \\ E_i &= \frac{\lambda}{\lambda_i} \left(E' \cos i - \frac{c+g}{2\lambda} \sin i \right).\end{aligned}$$

Как видно, изменению подверглись все коэффициенты девиации, но больше всех изменяется C' . Поэтому существующие способы уничтожения креновой девиации направлены в первую очередь на то, чтобы не допустить больших изменений при крене судна именно этого коэффициента.

§ 26. УНИЧТОЖЕНИЕ КРЕНОВОЙ ДЕВИАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ДЕФЛЕКТОРА КОЛОНГА

Если судно лежит на магнитном курсе E или W, то вертикальная составляющая магнитного поля в центре картушки компаса, согласно уравнениям Пуассона (99), равна

$$Z'_{E, W} = (1+k)Z + R.$$

Здесь важно отметить, что проекция hY в этом уравнении во внимание не принимается, потому что параметр h считается равным нулю. Что же касается проекции gX , то она обращается в нуль независимо от величины параметра g , так как на данных курсах $X = 0$.

Условия уничтожения креновой девиации от поперечного крена требуют, чтобы наряду с уничтоженной полукруговой девиацией от силы $C'\lambda H$ соблюдались равенства $R = 0$ и $e = k$. Подставив эти условия в выражение вертикальной составляющей $Z'_{E, W}$, будем иметь

$$Z'_{E, W} = (1+e)Z. \quad (104)$$

Следовательно, креновая девиация от поперечного крена будет уничтожена в том случае, если вертикальная составляющая напряженности магнитного поля $Z'_{E, W}$, действующая на стрелки компаса на магнитных курсах E или W , будет выражаться равенством (104). При этом имеется в виду, что сила $C'\lambda H$ компенсирована.

Если же условие (104) на судне не выполняется, т. е. если вертикальная составляющая магнитного поля, действующая на картушку компаса на судне, не равна (104), то необходимо установить в нактоузе компаса вертикальный (креновой) магнит и перемещением его вверх или вниз искусственно создать это равенство. Но для этого нужно предварительно рассчитать $Z'_{E, W}$. Для приведения к расчетному виду формулу (104) необходимо преобразовать.

Напишем выражения двух коэффициентов:

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2} \quad \text{и} \quad \lambda D' = \frac{a-e}{2},$$

а затем произведем вычитание правых и левых частей полученных выражений:

$$\lambda(1 - D') = 1 + e.$$

Подставим последнее в формулу (104):

$$Z'_{E, W} = \lambda(1 - D')Z. \quad (105)$$

Из этой формулы видно, что если известны вертикальная составляющая магнитного поля Земли Z , остаточный коэффициент четвертной девиации D' и коэффициент λ , то можно рассчитать величину вертикальной составляющей $Z'_{E, W}$, которую нужно создать на судне у компаса, чтобы креновая девиация от поперечного крена была уничтожена.

Для практического выполнения уничтожения креновой девиации необходимо следующее.

1. На берегу, в порту стоянки судна (или на льду в районе плавания) измерить составляющие H и Z при помощи дефлектора Колонга. Определить на судне у компаса величину $\lambda(1 - D')$ и рассчитать в дефлекторных единицах $Z'_{E, W}$ по формуле (105).

2. Перейти на судно. Лечь на магнитный курс E или W ; снять с нактоуза котелок судового компаса и поместить на его место креновой котелок с наклонной картушкой. Измерительный магнит дефлектора, собранного для измерения вертикальных сил, установить на рассчитанный отсчет $Z'_{E, W}$, а сам дефлектор поместить на крышку кренового котелка. В этом случае измерительный магнит дефлектора будет создавать в центре котелка вертикально направленное магнитное поле напряженностью $Z'_{E, W}$.

Если действующая в противоположном направлении вертикальная составляющая судового магнитного поля также равна величине $Z'_{E, W}$, то эти поля взаимно компенсируются и стрелки наклонной картушки,

помещенной в креновом котелке, займут горизонтальное положение. В этом случае на судне у компаса креновой девиации наблюдаться не должно.

Если же стрелки наклонной картушки окажутся наклоненными к горизонту, значит, одно из условий уничтожения креновой девиации не выполняется: судовая вертикальная составляющая напряженности магнитного поля не равна рассчитанной величине $Z'_{E, W}$. Чтобы уравнять ее, нужно переместить креновой магнит в нактоузе вверх или вниз, пока стрелки картушки не займут горизонтального положения. На этой высоте креновой магнит следует закрепить и уничтожение креновой девиации от поперечного крена считать законченным.

В этом способе уничтожения креновой девиации в отличие от другого способа, изложенного в следующем параграфе, компенсацию силы $C'\lambda H$ можно производить либо в начале, либо в конце работ — принципиального значения это не имеет¹. Важно, чтобы были хорошо компенсированы все силы, производящие девиацию.

Как отмечалось выше, от этого выигрывает точность уничтожения креновой девиации, происходящей от продольного и от поперечного крена.

§ 27. УНИЧТОЖЕНИЕ КРЕНОВОЙ ДЕВИАЦИИ С ПОМОЩЬЮ СУДОВОГО ИНКЛИНАТОРА²

Если на судне уничтожена полукруговая девиация от силы $C'\lambda H$, то на магнитных курсах E и W поперечная составляющая напряженности магнитного поля в центре картушки компаса, согласно уравнениям Пуассона (99), равна

$$H'_{E, W} = \lambda(1 - D')H, \quad (106)$$

где по условию $Q = 0$; $Y'_{E, W} = H'_{E, W}$, а сумма $1 + e$, как и в предыдущем параграфе, заменена $\lambda(1 - D')$.

Ранее было установлено, что для уничтожения креновой девиации от поперечного крена требуется, чтобы вертикальная составляющая $Z_{E, W}$, действующая на стрелки компаса на судне, удовлетворяла условию (105).

Если разделим правую и левую части выражения (105) на равенство (106), то в результате деления будем иметь

$$\frac{Z'_{E, W}}{H'_{E, W}} = \frac{Z}{H}.$$

¹ Хотя на практике целесообразно сначала уничтожить креновую девиацию, а затем полукруговую.

² В. П. Кожухов. О креновой девиации. Ученые записки ЛВИМУ. Вып. 1, 1955.

Величина $\frac{Z}{H}$ равна тангенсу магнитного наклоения I в районе нахождения судна. Отношение $\frac{Z'_{E,W}}{H'_{E,W}}$ будет равно тангенсу магнитного наклоения $I'_{E,W}$ на самом судне, в центре компаса, на магнитных курсах E или W . Следовательно,

$$\operatorname{tg} I'_{E,W} = \operatorname{tg} I$$

или

$$I'_{E,W} = I.$$

Таким образом, условие уничтожения креновой девиации свелось к равенству берегового и судового магнитных наклоений. Это условие может быть сформулировано так: если на судне на магнитном курсе E или W после уничтожения полукруговой девиации от силы $C' \lambda H$ магнитное наклоение $I'_{E,W}$ в центре компасных стрелок равно береговому магнитному наклоению I , то у такого компаса креновой девиации от поперечного крена наблюдаться не будет.

Если же этого равенства магнитных наклоений нет, то его нужно создать на судне искусственным путем. Для этого необходимо следующее.

1. В порту стоянки судна измерить при помощи судового инклинатора береговое магнитное наклоение, для чего, установив инклинатор на треногу, нужно поворачивать его вокруг вертикальной оси вправо или влево, пока стрелка прибора не остановится на наименьшем отсчете. Этот отсчет при хорошо выверенном приборе равняется магнитному наклоению.

2. На судне любым из известных способов уничтожения полукруговой девиации компенсировать силу $C' \lambda H$.

3. Лечь на магнитный курс E или W , или, продолжая лежать на этом курсе (в зависимости от способа уничтожения полукруговой девиации), установить в кольца пружинного подвеса нактоуза судовой инклинатор, предварительно вынув оттуда котелок компаса. Если отсчет по стрелке инклинатора окажется не равным тому отсчету, который был получен на берегу, то, перемещая в трубе девиационного прибора вертикальный (креновой) магнит вверх или вниз, нужно добиться равенства этих отсчетов. Затем креновой магнит следует закрепить на той высоте, на которой было достигнуто это равенство.

На этом уничтожение креновой девиации от поперечного крена заканчивается. Остается только проверить, не нарушена ли достигнутая ранее компенсация силы $C' \lambda H$ из-за того, что ось кренового магнита не совпадает с центром компаса.

В дополнение следует еще раз сказать, что если хорошо компенсировать силы $C' \lambda H$ и $D' \lambda H$, то вместе с девиацией от поперечного крена будет уничтожена также девиация от продольного крена.

Анализ точности показывает, что если в магнитной широте Ленинграда ($I = 73^\circ$) при уничтожении креновой девиации с помощью су-

дового инклинометра была допущена ошибка в отсчете по шкале прибора $\pm 0^{\circ},5$, то при плавании в Балтийском море эта ошибка вызовет остаточную креновую девиацию, не превышающую $\pm 0^{\circ},1$ на один градус крена. Как видим, инклинометр обеспечивает высокую точность уничтожения креновой девиации. В южных морях эта точность будет выше.

Требования к точности удержания судна на курсе во время уничтожения креновой девиации с помощью инклинометра следующие: если в широте Ленинграда при уничтожении креновой девиации допустить уход судна с курса вправо или влево до 10° , то происходящая от этого ошибка креновой девиации также не будет превышать $\pm 0^{\circ},1$ на каждый градус крена.

Остановимся еще на одном вопросе. Условия уничтожения креновой девиации от поперечного крена требуют, с одной стороны, полной компенсации вертикальной составляющей магнетизма жесткого в магнитном отношении судового железа ($R = 0$) и, с другой стороны, равенства параметров ($k = e$) магнитно мягкого железа. Поэтому правильнее было бы уничтожить эту девиацию так: постоянным креновым магнитом доводить R до нуля, а подбором под компасом вертикального бруска мягкого железа обеспечивать $k = e$. Но этого, как мы видели, не делается. Креновая девиация уничтожается постоянным магнитом, который «заменяет» собой и мягкий в магнитном отношении вертикальный брусок. Понятно, что такая замена приводит к тому, что креновая девиация оказывается уничтоженной только для данной магнитной широты. С изменением широты района плавания она изменяет свою величину. Поэтому на больших переходах нужно следить за компасом, по возможности подуничтожая креновую девиацию. Иногда это удается сделать при боковой качке на курсах N или S, когда креновая девиация проявляется особенно сильно. Если в этих условиях картушка начинает «ходить» вправо и влево, то надо перемещать креновый магнит в нактоузе компаса вверх или вниз, чтобы уменьшить это «хождение».

Коснувшись простейших способов уничтожения креновой девиации, необходимо сказать, что на малых судах и на катерах она может быть уничтожена путем создания на судне искусственного крена. Для этого нужно направить судно по курсу N или S и взять пеленг отдаленного предмета $ОКП_0$. Затем, накренив судно градусов на 10 на один борт, повторить пеленгование того же предмета. Если пеленг при крене судна изменится, то, продолжая удерживать судно в накренинном положении, нужно переместить креновой магнит в трубе девиационного прибора вверх или вниз, пока пеленг того же предмета не примет своего прежнего значения $ОКП_0$. То же самое нужно повторить при крене на другой борт, создавая крен точно такой же величины, как и в первом случае. Если пеленг того же отдаленного предмета окажется равным $ОКП_1$, то креновой магнит следует передвинуть в нактоузе вверх или вниз так, чтобы этот пеленг равнялся $1/2 (ОКП_0 + ОКП_1)$. После этого крен нужно выровнять. Креновая девиация будет уничтожена.

§ 28. СОВМЕСТНОЕ УНИЧТОЖЕНИЕ КРЕНОВОЙ И ПОЛУКРУГОВОЙ ДЕВИАЦИЙ

Уничтожение полукруговой девиации от силы $C'\lambda H$ при работе способами Колонга и $E - W$ магнитных выполняется на основе формулы

$$H'_{\text{ср}} = Y'_{\text{ср}} = \lambda(1 - D')H. \quad (107)$$

При этом величина $\lambda(1 - D')H$ вычисляется по результатам измерений сил $H'_E(Y'_E)$ и $H'_W(Y'_W)$, действующих на картушку на магнитных курсах 90° и 270° .

В то же время аналитическим условием уничтожения креновой девиации на магнитных курсах E и W является выражение (105)

$$Z'_{F, W} = \lambda(1 - D')Z.$$

Формулы (107) и (105) содержат одинаковый сомножитель $\lambda(1 - D')$. Следовательно, зная величину $\lambda(1 - D')H$, легко вычислить и $Z'_{E, W}$. Для этого достаточно умножить $H'_{\text{ср}}$ на отношение $\frac{Z}{H}$:

$$H'_{\text{ср}} \cdot \frac{Z}{H} = \frac{H'_E + H'_W}{2} \cdot \frac{Z}{H} = \lambda(1 - D')H \cdot \frac{Z}{H} = \lambda(1 - D')Z.$$

Иными словами, измеренные силы $H'_E(Y'_E)$ и $H'_W(Y'_W)$ являются одновременно исходными данными как для уничтожения полукруговой, так и для уничтожения креновой девиаций.

Поэтому указанные девиации обычно уничтожаются совместно, что позволяет сократить время, затрачиваемое на девиационные работы.

Совместное уничтожение креновой и полукруговой девиаций на четырех главных компасных курсах

1. Измерить на берегу составляющие H и Z земного магнетизма.
2. Лечь на компасный курс $0^\circ(180^\circ)$; измерить дефлектором силу $H'_N(H'_S)$.
3. Лечь на компасный курс $180^\circ(0^\circ)$; измерить дефлектором силу $H'_S(H'_N)$.

4. Вычислить $H'_{\text{ср}} = \frac{H'_N + H'_S}{2}$; установить измерительный магнит дефлектора на отсчет, равный $H'_{\text{ср}}$, и с помощью продольных магнитов-уничтожителей подвести под призму пеленгатора отсчет 270° картушки. В результате будет компенсирована сила $B'\lambda H$.

5. Лечь на компасный курс $90^\circ(270^\circ)$ (заметим, что после компенсации силы $B'\lambda H$ компасный курс $90^\circ(270^\circ)$ является одновременно и магнитным курсом); измерить дефлектором силу $H'_E(H'_W)$.

6. Лечь на компасный (он же магнитный) курс $270^\circ(90^\circ)$; измерить дефлектором силу $H'_W(H'_E)$.

7. Вычислить $H''_{\text{ср}} = \frac{H'_E + H'_W}{2}$ и $Z''_{E, W} = H''_{\text{ср}} \cdot \frac{Z}{H}$; установить в нактоуз креновой котелок с наклонной картушкой; подготовить дефлектор к измерению вертикальных сил и установить его измерительный магнит на отсчет, равный $Z''_{E, W}$ по шкале вертикальных сил; поставить дефлектор на чашку кренового котелка и, действуя креновым магнитом, привести стрелки наклонной картушки в горизонтальное положение. В результате будет компенсирована сила, вызывающая креновую девиацию при поперечном крене судна.

8. Продолжая следовать *КК (МК) 270° (90°)*, установить в нактоуз котелок компаса; подготовить дефлектор к измерению горизонтальных сил и поставить его измерительный магнит на отсчет, равный $H''_{\text{ср}}$; установить пеленгатор и дефлектор в плоскости компасного меридиана; с помощью поперечных магнитов-уничтожителей подвести под призму пеленгатора отсчет 270° картушки компаса. В результате будет компенсирована сила $C'\lambda H$.

9. Для контроля компенсации силы $B'\lambda H$ повторить измерения сил на компасных курсах 0 и 180° . Если вновь измеренные силы H''_N и H''_S окажутся неравными, то следует вторично компенсировать силу $B'\lambda H$ (см. п. 4).

Как мы видим, при совместном уничтожении креновой и полукруговой девиаций первая уничтожается до компенсации сил $B'\lambda H$ и $C'\lambda H$. Такого порядка работы придерживаются из опасения, что в случае неправильной установки девиационного прибора в нактоузе креновой магнит будет действовать на картушку не только вертикальной, но и горизонтальной силой и нарушит уничтожение полукруговой девиации.

Совместное уничтожение креновой и полукруговой девиации на главных магнитных курсах E и W

1. Измерить на берегу составляющие H и Z земного магнетизма.
2. Лечь на магнитный курс 90° (270°); с помощью продольных магнитов уничтожить наблюдаемую девиацию $\delta_E(\delta_W)$ до нуля.
3. Установить пеленгатор на отсчет 270° (90°) по азимутальному кругу и измерить дефлектором поперечную проекцию $Y'_E(Y'_W)$.
4. Лечь на магнитный курс 270° (90°); определить и записать величину девиации $\delta_W(\delta_E)$.
5. Установить пеленгатор на отсчет 90° (270°) по азимутальному кругу и измерить дефлектором поперечную проекцию $Y'_W(Y'_E)$.
6. Вычислить

$$Y'_{\text{ср}} = \frac{Y'_E + Y'_W}{2} = \lambda(1 - D')H$$

и

$$Z'_{E, W} = Y'_{\text{ср}} \cdot \frac{Z}{H} = \lambda(1 - D')Z.$$

7. Заменить котелок компаса креновым котелком с наклонной картушкой; подготовить дефлектор к измерению вертикальных сил, установить его измерительный магнит на отсчет, равный $Z'_{E, W}$, и поставить дефлектор на чашку кренового котелка; перемещая креновой магнит, привести стрелки картушки в горизонтальное положение. В результате будет уничтожена креновая девиация.

8. Установить в нактоуз котелок компаса; подготовить дефлектор к измерению горизонтальных сил и установить его магнит на отсчет, равный Y'_{cp} ; установить пеленгатор на отсчет 90° (270°) по азимутальному кругу, а затем поставить на чашку пеленгатора дефлектор с измерительным магнитом, стоящим на отсчете, равном Y'_{cp} . Действуя поперечными магнитами-уничтожителями, подвести под призму пеленгатора отсчет 270° картушки. В результате будет компенсирована сила $C'\lambda H$.

9. Снять дефлектор и с помощью продольных магнитов-уничтожителей довести девиацию $\delta_w(\delta_E)$ до половины той величины, которую она имела в п. 4. В результате будет компенсирована сила $B'\lambda H$.

Вполне понятно, что одновременное уничтожение креновой и полукруговой девиаций можно производить и в тех случаях, когда последняя уничтожается способом Эри. Но в связи с тем, что этот способ не предусматривает измерений горизонтальных сил, все сводится к чисто механическому совмещению двух различных по своему характеру работ.

Укажем на наиболее рациональный порядок работы при одновременном уничтожении креновой и полукруговой девиаций на четырех главных магнитных курсах.

1. Измерить на берегу составляющие H и Z земного магнетизма.

2. Лечь на магнитный курс 90° (270°) и с помощью продольных магнитов-уничтожителей довести наблюдаемую девиацию до нуля; измерить дефлектором горизонтальную силу $H'_E(H'_W)$.

3. Лечь на магнитный курс 270° (90°); определить и записать величину девиации $\delta_w(\delta_E)$; измерить дефлектором горизонтальную силу $H'_W(H'_E)$.

4. Вычислить

$$Z'_{E, W} = \frac{H'_E + H'_W}{2} \cdot \frac{Z}{H} = \lambda(1 - D')Z$$

и уничтожить креновую девиацию.

5. На том же МК 270° (90°), поставив в нактоуз котелок компаса, с помощью продольных магнитов-уничтожителей довести девиацию до половины замеченной ранее (п. 3) величины. В результате будет компенсирована сила $B'\lambda H$.

После этого обычным путем компенсируется сила $C'\lambda H$. Работа по совместному уничтожению креновой и полукруговой девиаций значительно упрощается, если вместо картушки с наклонными стрелками использовать судовой инклинатор. При этом необходимо только со-

блности условие: уничтожение креновой девиации по показаниям инклинатора следует выполнять после компенсации силы $C'\lambda H$.

Рассмотрим в качестве примера случай совместного уничтожения девиации с применением судового инклинатора на четырех главных магнитных курсах.

1. Измерить на берегу с помощью инклинатора магнитное наклонение I (или снять величину наклона с карты изоклин и вычесть из нее инструментальную поправку инклинатора).

2. Лечь на магнитный курс 0° (180°) и, действуя поперечными магнитами-уничтожителями, довести наблюдаемую девиацию $\delta_N(\delta_S)$ до нуля.

3. Лечь на магнитный курс 180° (0°) и с помощью поперечных магнитов уменьшить девиацию $\delta_S(\delta_N)$ в два раза. В результате будет компенсирована сила $C'\lambda H$.

4. Лечь на магнитный курс 90° (270°); установить в нактоуз судовой инклинатор и, перемещая креновой магнит, довести отсчет по шкале прибора до величины I . В результате будет уничтожена креновая девиация.

5. Установить в нактоуз котелок компаса и с помощью продольных магнитов уничтожить $\delta_E(\delta_W)$ до нуля.

6. Лечь на магнитный курс 270° (90°) и, действуя продольными магнитами, уменьшить наблюдаемую девиацию $\delta_W(\delta_E)$ в два раза. В результате будет компенсирована сила $B'\lambda H$.

Для контроля можно повторить компенсацию силы $C'\lambda H$ на курсах 0 и 180° .

Глава VII

УНИЧТОЖЕНИЕ ЧЕТВЕРТНОЙ ДЕВИАЦИИ

§ 29. ПРИНЦИП УНИЧТОЖЕНИЯ ЧЕТВЕРТНОЙ ДЕВИАЦИИ

Четвертную девиацию производят силы $D'\lambda H$ и $E'\lambda H$, происходящие от мягкого в магнитном отношении судового железа. Поэтому уничтожение четвертной девиации сводится к компенсации сил $D'\lambda H$ и $E'\lambda H$.

Исходя из общего принципа уничтожения девиации, можно сказать, что для компенсации сил $D'\lambda H$ и $E'\lambda H$ необходимо на нактоузе компаса установить компенсаторы из мягкого ферромагнитного материала. Эти компенсаторы должны создавать силы, равные судовым силам, но противоположные им по направлению.

Введем следующие обозначения.

D'_0, E'_0 — коэффициенты, обусловленные действием мягкого судового железа;

D'_1, E'_1 — коэффициенты, образованные компенсаторами четвертной девиации;

D', E' — коэффициенты, обусловленные совместным влиянием судового железа и компенсаторов четвертной девиации.

Условие уничтожения четвертной девиации можно выразить следующими соотношениями:

$$D' = (D'_0 + D'_1) = 0; \quad E' = (E'_0 + E'_1) = 0.$$

Четвертные коэффициенты девиации D' и E' , образованные совместным действием судового железа и компенсаторов, обычно называют остаточными коэффициентами четвертной девиации.

Очевидно, что чем меньше по абсолютной величине остаточные коэффициенты D' и E' , тем лучше выполнено уничтожение четвертной девиации.

Рассмотрим компенсацию судовой силы $D'_0 \lambda H$, образованной продольными и поперечными частями судна. Для этого напишем следующее выражение для коэффициента D'_0 :

$$D'_0 = \frac{a_0 - e_0}{2\lambda_0} = \frac{a_0 - e_0}{2 + a_0 + e_0}.$$

На судах, как правило, параметры a_0 и e_0 отрицательные¹, причем по абсолютной величине параметр e_0 всегда больше параметра a_0 . Исходя из этого, можно установить, что судовой коэффициент D'_0 в подавляющем большинстве случаев положительный. Это значит, что компенсаторы, предназначенные для уничтожения силы $D'_0 \lambda H$, должны создавать отрицательный коэффициент D'_1 . Коэффициент D'_1 будет отрицательным, если в алгебраическом выражении

$$D'_1 = \frac{a_1 - e_1}{2 + a_1 + e_1}$$

числитель $a_1 - e_1$ будет отрицательным числом. Это, в свою очередь, возможно, когда параметр $a_1 < 0$ (отрицателен) и параметр $e_1 > 0$ (положителен). Такому условию удовлетворяет любая масса железа симметричной формы, расположенная справа и слева от компаса так, чтобы одна из осей симметрии этой массы находилась в поперечной плоскости, проходящей через центр компаса O (рис. 64).

Возьмем в качестве компенсатора силы $D'_0 \lambda H$ железный брусок произвольного сечения и поместим его так, как показано на рис. 64.

¹ Параметры Пуассона, образованные судовым железом, обозначаются через a_0, e_0, b_0, d_0 и т. д.; параметры, образованные компенсаторами, — соответственно через a_1, e_1, b_1 и т. д. Аналогично обозначается коэффициент λ .

λ_0 — образованный судовым железом;

λ_1 — образованный компенсаторами.

Брусок будет намагничиваться продольной X и поперечной Y составляющими земного магнитного поля. Продольная и поперечная намагниченности бруска будут создавать в центре компаса (точка O) силы $-a_1X$ и $+e_1Y$, т. е. в точке O образуются отрицательный параметр a_1 и положительный параметр e_1 . Следовательно, такой брусок в точке O создает отрицательную силу $D'_1\lambda H$, которая может компенсировать судовую силу $D_0\lambda H$, имеющую положительное направление.

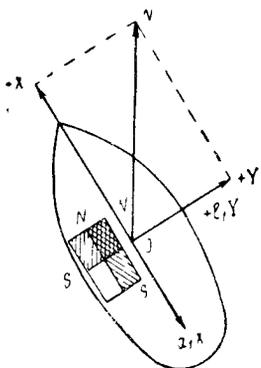


Рис 64

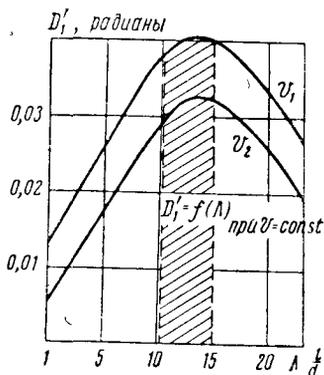


Рис. 65

Если в качестве компенсаторов возьмем массу железа другой симметричной формы, например параллелепипед, куб, шар, эллипсоид, пластину прямоугольной формы, и установим ее так, как показано на рис. 64, то сущность компенсации не изменится. В результате продольного и поперечного намагничивания компенсаторов будут образованы отрицательный параметр a_1 и положительный параметр e_1 , т. е. получим отрицательный коэффициент D'_1 .

С этой точки зрения компенсатору может быть придана любая из указанных форм, но, безусловно, удобнее применять такую форму, которая обеспечивает образование максимального коэффициента D'_1 при заданном объеме (массе) компенсатора. Кроме того, необходимо учитывать другое обстоятельство — простоту изготовления компенсатора. Наиболее распространенным видом компенсатора являются бруски круглого сечения, имеющие рациональное отношение длины к диаметру¹. Исследования показывают, что коэффициент D'_1 при постоянном (заданном) объеме бруска имеет определенную зависимость от относительной длины Λ бруска. На рис. 65 изображен график, показывающий эту зависимость.

¹ Отношение длины l к диаметру d называется относительной длиной бруска и обозначается через $\Lambda = \frac{l}{d}$.

График построен на основе формулы

$$D' = \frac{a-e}{2+a+e},$$

где параметры a и e определяются выражениями (см. § 6):

$$a = \kappa_1 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}; \quad e = \kappa_2 \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}.$$

Для цилиндрического бруска, имеющего длину $2l$, поперечное сечение s , объем v , можно найти значение гравитационного потенциала

$$V = s \int_{-l}^{+l} \frac{dx}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = s [\ln(\sqrt{l^2 + r^2} + l) - \ln(\sqrt{l^2 + r^2} - l)].$$

Следовательно, выражения параметров, входящие в формулу коэффициента D' , будут иметь следующий вид:

$$a = -\frac{\kappa_1 v}{(l^2 + r^2)^{3/2}}; \quad e = \frac{2\kappa_2 v}{(l^2 + r^2)^{3/2}} \left(1 + \frac{l^2}{2r^2}\right),$$

где $v = sl$ и r — кратчайшее расстояние до бруска.

При постоянном объеме v полудлина l бруска может быть выражена через относительную длину бруска:

$$l = \frac{\Lambda d}{2} = \frac{\Lambda}{2} \sqrt[3]{\frac{4v}{\pi\Lambda}} = 0,5418\Lambda \sqrt[3]{\frac{v}{\Lambda}}.$$

Тогда формула $D' = \frac{a-e}{2+a+e}$ будет иметь вид функции $D' = f(\Lambda)$, график которой изображен на рис. 65. Из графика видно, что наиболее рациональной является относительная длина Λ от 10 до 15.

В целях экономии материала и создания компактной установки компенсаторы для уничтожения четвертной девиации, выполненные в виде брусков круглого сечения, должны иметь указанную относительную длину.

§ 30. КОМПЕНСАЦИЯ СИЛЫ $D'_0 \chi H$

В настоящее время для уничтожения четвертной девиации применяют следующие виды компенсаторов:

- продольные бруски круглого сечения,
- поперечные бруски прямоугольного сечения,
- шары (пустотелые или сплошные).

Наибольшее распространение получили продольные бруски круглого сечения. Они устанавливаются на компасах большинства транспортных судов. Поперечные бруски прямоугольного сечения, как правило, устанавливаются на шлюпочных и катерных компасах. Шары, менее удобные в обращении, чем бруски, устанавливаются редко. Установка шаров вызывается тем обстоятельством, что при их помощи можно создать большой по величине коэффициент D'_1 . Поэто-

му установкой шаров уничтожается четвертная девиация у компасов, находящихся в неблагоприятных магнитных условиях, когда судовой коэффициент D'_0 имеет значительную величину (порядка 10° и более).

Рассмотрим каждый вид компенсаторов в отдельности.

Продольные бруски (рис. 66). Обычно применяют два бруска круглого сечения. Поскольку длина брусков значительно превышает их диаметр, поперечным намагничиванием можно пренебречь и считать $e_1 = 0$. Продольное намагничивание брусков образует отрицательный параметр a_1 . Следовательно, коэффициент D'_1 будет отрицательным:

$$D'_1 = \frac{(-a_1) - (0)}{2\lambda_1} = -\frac{a_1}{2\lambda_1}.$$

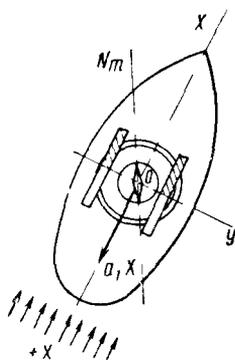


Рис 66

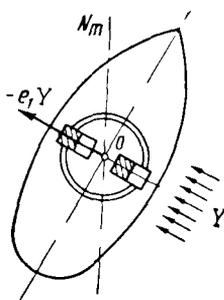


Рис. 67

Бруски устанавливаются в верхней части нактоуза компаса, справа и слева от диаметральной плоскости, параллельно оси ox . Середина брусков должна лежать в вертикальной поперечной плоскости, проходящей через ось oy . Горизонтальная плоскость, в которой лежат бруски, или совпадает с плоскостью магнитной системы компаса или лежит несколько ниже ее.

Условие уничтожения четвертной девиации, т. е. равенство коэффициентов

$$D'_0 = -D'_1,$$

достигается подбором брусков большей или меньшей длины.

Поперечные бруски—два бруска, прямоугольного сечения, установленные в поперечной плоскости, как показано на рис. 67.

Бруски намагничиваются поперечной составляющей Y земного магнитного поля и образуют положительный параметр e_1 . Намагничиванием брусков в продольной плоскости можно пренебречь и считать $a_1 = 0$. Коэффициент D'_1 , образованный поперечными брусками, имеет знак минус:

$$D'_1 = \frac{(0) - (+e_1)}{2\lambda_1} = -\frac{e_1}{2\lambda_1}.$$

Равенство коэффициентов $D'_0 = -D'_1$ достигается подбором поперечных брусков большего или меньшего размера, а также установкой их на большем или меньшем расстоянии от центра компаса.

Ш а р ы (рис. 68) — обычно два шара, пустотелые или сплошные, установленные с боков компаса, справа и слева от диаметральной плоскости. Центры шаров должны лежать в поперечной плоскости компаса на уровне или несколько ниже магнитной системы.

Шары намагничиваются одновременно продольной X и поперечной Y составляющими земного поля. В результате этого образуется

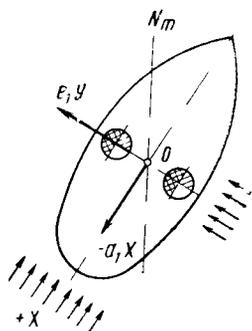


Рис 68

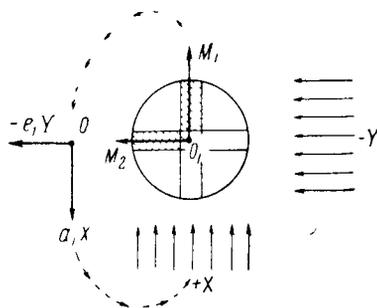


Рис. 69

отрицательный параметр a_1 и положительный параметр e_1 . Коэффициент D'_1 будет отрицательным:

$$D'_1 = \frac{(-a_1) - (+e_1)}{2\lambda_1} = -\frac{a_1 + e_1}{2\lambda_1}.$$

Если представить шар в виде совокупности двух одинаковых брусков — продольного и поперечного, то можно доказать, что параметр a_1 по абсолютной величине в два раза меньше, чем параметр e_1 . Действительно, точка O (центр компаса) находится на продолжении оси продольного бруска (рис. 69) и сила $a_1 X$ может быть представлена в виде

$$-a_1 X = \frac{M_1}{r^3},$$

где M_1 — магнитный момент, обусловленный продольным намагничиванием шара;

r — расстояние между центром компаса (O) и центром шара (O_1).

Но точка O в то же время находится на перпендикуляре, проведенном через середину поперечного бруска, следовательно, сила $e_1 Y$ может быть представлена в виде¹

$$-e_1 Y = \frac{2 \cdot M_2}{r^3},$$

¹ См. формулы (10) и (13).

где M_2 — магнитный момент, обусловленный поперечным намагничиванием шара.

Магнитные моменты M_1 и M_2 можно записать в следующем виде:

$$M_1 = \kappa_1 X \cdot v; \quad M_2 = -2\kappa_2 Y \cdot v,$$

где κ_1 и κ_2 — величины магнитной восприимчивости в направлении осей ox и oy ;

v — объем шара.

Тогда будем иметь:

$$\begin{aligned} -a_1 X &= \frac{\kappa_1 X \cdot v}{r^3}; & -a_1 &= \frac{\kappa_1 v}{r^3}; \\ e_1 Y &= \frac{2\kappa_2 Y v}{r^3}; & e_1 &= \frac{2\kappa_2 v}{r^3}. \end{aligned}$$

Так как для шара $\kappa_1 = \kappa_2$, то, следовательно, e_1 в два раза больше, чем a_1 , т. е.

$$|e_1| = 2|a_1|.$$

Значит, для шара можно считать

$$|D'_1| = \frac{(-a_1) - (+2a_1)}{2\lambda_1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{a_1}{2\lambda_1}.$$

Равенство $D'_0 = -D'_1$ достигается подбором шаров большего или меньшего диаметра и установкой их на большем или меньшем расстоянии от центра компаса.

Мы рассмотрели компенсацию силы $D'_0 \lambda H$ при помощи продольных и поперечных брусков и шаров. В большинстве случаев (для главных компасов почти всегда) уничтожение четвертной девиации ограничивается компенсацией силы $D'_0 \lambda H$, так как сила $E'_0 \lambda H$, как правило, очень мала. Но все же в отдельных случаях (особенно это относится к путевым компасам) сила $E'_0 \lambda H$ имеет заметную величину и должна быть компенсирована.

Рассмотрим принцип компенсации силы $E'_0 \lambda H$.

§ 31. КОМПЕНСАЦИЯ СИЛЫ $E'_0 \lambda H$

Прежде всего следует отметить, что судовая сила $E'_0 \lambda H$ всегда значительно меньше силы $D'_0 \lambda H$ и для ее компенсации не требуется специальных компенсаторов. Компенсация силы $E'_0 \lambda H$ может быть выполнена одновременно с компенсацией силы $D'_0 \lambda H$ теми же самыми продольными (поперечными) брусками или шарами, если эти бруски (или шары) развернуть в горизонтальной плоскости на некоторый угол α относительно диаметральной плоскости судна.

Рассмотрим уничтожение четвертной девиации от силы $E'_0 \lambda H$ на примере одного продольного бруска. Расположим брусок так, как

показано на рис. 70. Будем считать, что брусок намагничивается только теми составляющими магнитного поля, которые направлены по продольной оси бруска. Брусок повернут относительно оси ox на угол α , поэтому продольная намагниченность бруска обуславливается составляющими $+X \cos \alpha$ и $-Y \sin \alpha$. Поворот бруска выполнен так, что после поворота центр компаса (точка 0) остается лежать на перпендикуляре к бруску, проходящем через его середину (точка O_1). Поэтому в точке 0 вектор напряженности бруска направлен параллельно его продольной оси. Этот вектор состоит из двух компонентов, один из которых пропорционален намагничивающему полю $+X \cos \alpha$ и имеет отрицательное направление, другой намагничивающему полю $-Y \sin \alpha$ и имеет положительное направление.

Обозначим коэффициент пропорциональности через m . Тогда компоненты вектора напряженности в точке 0 получат выражения:

$$H_1 = -mX \cos \alpha; H_2 = +mY \sin \alpha.$$

Направления этих сил всегда противоположны направлениям намагничивающих полей, поэтому коэффициент пропорциональности m всегда имеет знак минус. Величина этого коэффициента зависит от магнитной восприимчивости материала бруска, его формы и размеров, а также удаления бруска от точки 0.

Силы H_1 и H_2 можно разложить на составляющие по осям ox и oy . Получим четыре составляющие — две продольные a_1X , b_1Y и две поперечные d_1X ; e_1Y .

Из рис. 70 видно, что эти силы по абсолютной величине равны следующим значениям:

$$\begin{aligned} a_1 X &= H_1 \cos \alpha = mX \cos^2 \alpha; & b_1 Y &= H_2 \cos \alpha = mY \sin \alpha \cos \alpha; \\ d_1 X &= H_1 \sin \alpha = mX \cos \alpha \sin \alpha; & e_1 Y &= H_2 \sin \alpha = mY \sin^2 \alpha, \end{aligned}$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} |a_1| &= m \cos^2 \alpha = \frac{m}{2} + \frac{m}{2} \cos 2\alpha \\ |b_1| &= m \sin \alpha \cos \alpha = -\frac{m}{2} \sin 2\alpha \\ |d_1| &= m \cos \alpha \sin \alpha = -\frac{m}{2} \sin 2\alpha \\ |e_1| &= m \sin^2 \alpha = \frac{m}{2} - \frac{m}{2} \cos 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (108)$$

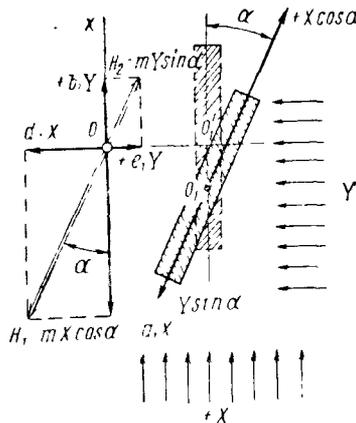


Рис. 70

Эти зависимости позволяют сделать вывод о численных значениях параметров и установить, что:

$$|b_1| = |d_1|; \quad |a_1| > |e_1|.$$

Знаки параметров также можно определить с помощью рис. 70. Сравнивая полученные силы $-a_1X$, $+b_1Y$, $-d_1X$ и $+e_1Y$ с компонентами намагничивающего поля $+X$ и $-Y$, получим¹:

$$\begin{aligned} -a_1X &= (-a_1)(+X); & +b_1Y &= (-b_1)(-Y); \\ -d_1X &= (-d_1)(+X); & +e_1Y &= (-e_1)(-Y). \end{aligned}$$

Это значит, что при повороте продольного бруска по часовой стрелке на некоторый угол относительно диаметральной плоскости появляются четыре отрицательных параметра: $-a_1$, $-b_1$, $-d_1$ и $-e_1$, которые образуют отрицательные коэффициенты D'_1 и E'_1 :

$$\begin{aligned} D'_1 &= \frac{(-a_1) - (-e_1)}{2\lambda} = -\left(\frac{a_1 - e_1}{2\lambda}\right); \quad |a_1| > |e_1|; \quad D'_1 < 0; \\ E'_1 &= \frac{(-d_1) + (-b_1)}{2\lambda} = -\left(\frac{d_1 + b_1}{2\lambda}\right); \quad E'_1 < 0. \end{aligned}$$

Следует отметить, что при повороте бруска величина коэффициента D'_1 несколько уменьшается по сравнению с величиной коэффициента D_1 , имевшей место до поворота бруска. Действительно, до поворота ($\alpha = 0$) коэффициент D_1 определялся выражением

$$D_1 \underset{(\alpha=0)}{=} -\frac{a_1}{2\lambda} = -\frac{\frac{m}{2} + \frac{m}{2} \cos 2\alpha}{2\lambda} = -\frac{m}{2\lambda}.$$

После поворота на угол α :

$$\begin{aligned} D'_1 \underset{(\alpha \neq 0)}{=} & -\frac{a_1 - e_1}{2\lambda} = -\frac{1}{2\lambda} \left[\left(\frac{m}{2} + \frac{m}{2} \cos 2\alpha \right) - \right. \\ & \left. - \left(\frac{m}{2} + \frac{m}{2} \cos 2\alpha \right) \right] = -\frac{m}{2\lambda} \cos 2\alpha. \end{aligned}$$

Следовательно:

$$\left| D'_1 \underset{(\alpha \neq 0)}{=} \right| < \left| D_1 \underset{(\alpha \neq 0)}{=} \right|.$$

Поворот бруска против часовой стрелки позволяет изменить знаки параметров d_1 и b_1 , в чем можно убедиться, подставив в выражения (108) отрицательное значение угла α :

$$a_1 = -\left[\frac{m}{2} + \frac{m}{2} \cos(-2\alpha) \right] = -\left(\frac{m}{2} + \frac{m}{2} \cos 2\alpha \right), \text{ т. е. } a_1 < 0;$$

¹ Сила считается положительной, если она направлена в сторону носа судна (продольная сила) или к правому борту (поперечная сила). Обратные направления сил считаются отрицательными.

$$b_1 = -\frac{m}{2} \sin(-2\alpha) = +\frac{m}{2} \sin 2\alpha, \text{ т. е. } b_1 > 0;$$

$$d_1 = -\frac{m}{2} \sin(-2\alpha) = +\frac{m}{2} \sin 2\alpha, \text{ т. е. } d_1 > 0;$$

$$e_1 = -\left[\frac{m}{2} - \frac{m}{2} \cos(-2\alpha) \right] = -\left(\frac{m}{2} + \frac{m}{2} \cos 2\alpha \right), \text{ т. е. } e_1 < 0.$$

Как видим, при повороте бруска против часовой стрелки параметры b_1 и d_1 , а следовательно, и коэффициент E'_1 меняют знак на обратный. Параметры a_1 и e_1 знаков не меняют.

Итак, при повороте бруска по часовой стрелке образуются коэффициенты $(-D'_1)$ и $(-E'_1)$, при повороте бруска против часовой стрелки — коэффициенты $(-D'_1)$ и $(+E'_1)$. Абсолютные значения коэффициентов, как это видно из выражений (108), зависят от величины m и угла поворота α .

Задача по уничтожению девиации от судовых сил $D'_0\lambda H$ и $E'_0\lambda H$ состоит в том, чтобы правильно подобрать длину брусков, обеспечивающих надлежащую величину параметра m , и рассчитать угол поворота брусков (α).

Эта задача решается следующим образом. Пусть судовые коэффициенты четвертной девиации имеют значения $+D'_0$ и $+E'_0$. В качестве компенсаторов возьмем два продольных бруска. Для уничтожения четвертной девиации необходимо поворотом этих брусков выполнить условия:

$$+D'_0 = -D'_1; \quad +E'_0 = -E'_1.$$

Напишем выражения коэффициентов на основании зависимостей (108):

$$D'_1 = \frac{a_1 - e_1}{2\lambda} = \frac{1}{2\lambda} \left[-\frac{m}{2} - \frac{m}{2} \cos 2\alpha + \frac{m}{2} - \frac{m}{2} \cos 2\alpha \right],$$

$$E'_1 = \frac{d_1 + b_1}{2\lambda}$$

или

$$\left. \begin{aligned} D'_1 &= -\frac{m}{2\lambda} \cos 2\alpha; \\ E'_1 &= -\frac{m}{2\lambda} \sin 2\alpha. \end{aligned} \right\} \quad (109)$$

Зависимость между величиной угла поворота и значениями коэффициентов можно получить из формулы (109) следующим образом:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{E'_1}{D'_1} = \frac{E'_0}{D'_0}. \quad (110)$$

Выражения (109) позволяют найти следующую зависимость:

$$\sqrt{D'^2_1 + E'^2_1} = \sqrt{D'^2_0 + E'^2_0} = \frac{m}{2\lambda}.$$

Величина $\frac{m}{2\lambda}$ есть не что иное, как коэффициент D'_1 , образуемый брусками при $\alpha = 0$; действительно,

$$D'_1 (\alpha=0) = \frac{m \cos 2\alpha}{2\lambda} = -\frac{m}{2\lambda}.$$

Следовательно, бруски должны иметь такую длину, чтобы четвертной коэффициент D'_1 , создаваемый брусками при $\alpha = 0$, был равен геометрической сумме судовых коэффициентов, т. е.

$$D'_1 (\alpha=0) = \sqrt{D_0'^2 + E_0'^2}. \quad (111)$$

Необходимая длина брусков подбирается в береговых условиях. На компасе устанавливают два продольных бруска и определяют коэффициент D'_1 при $\alpha = 0$. Если величина $D'_1 (\alpha = 0)$ окажется больше или меньше величины $\sqrt{D_0'^2 + E_0'^2}$, то длину брусков соответственно уменьшают или увеличивают, добывая равенства (111). После того как длина брусков подобрана, бруски поворачивают на угол α , причем величина и знак угла определяются из выражения (110). Бруски поворачиваются вместе с верхней частью нактоуза, имеющей для этого специальное приспособление для отсчета угла α . После разворота брусков пружинный подвес компаса необходимо повернуть на ту же величину α , но в противоположную сторону.

На рис. 71 показано расположение брусков и направление сил при уничтожении четвертной девиации от сил $D'_0\lambda H$ и $E'_0\lambda H$.

Судовые силы $D'_0\lambda H$ и $E'_0\lambda H$ имеют положительное направление, определяемое относительно магнитного меридиана соответственно углами $2k$ и $2k + 90^\circ$. Суммарная судовая сила численно равна величине $\lambda H \sqrt{D_0'^2 + E_0'^2}$, а ее направление относительно магнитного меридиана определяется суммой углов: $2k + \beta$. Величина угла β может быть найдена из выражения

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{E'_0 \lambda H}{D'_0 \lambda H} = \frac{E'_0}{D'_0},$$

но на основании формулы (110)

$$\frac{E'_0}{D'_0} = \operatorname{tg} 2\alpha,$$

следовательно,

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} 2\alpha,$$

откуда

$$\beta = 2\alpha$$

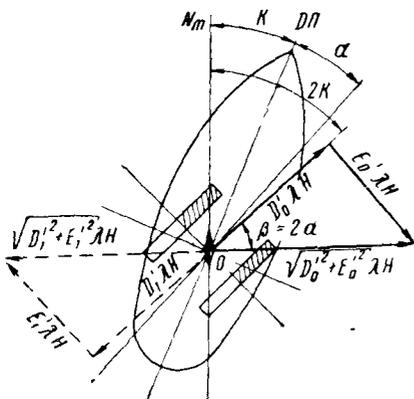


Рис. 71

Силы $D'_1 \lambda H$ и $E'_1 \lambda H$, образованные брусками, а также их результирующая $\lambda H \sqrt{D_0'^2 + E_0'^2}$ равны по величине и противоположны по направлению соответствующим судовым силам.

§ 32. ВЛИЯНИЕ МЯГКОГО ЖЕЛЕЗА НА ВЕЛИЧИНУ СУДОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА λ

Мягкое в магнитном отношении железо, расположенное симметрично относительно некоторой точки, например центра компаса, образует в этой точке силы aX и eY . Параметры a и e входят в выражения четвертных коэффициентов D' и E' . Параметры a и e также входят в выражение коэффициента $\lambda = 1 + \frac{a+e}{2}$, характеризующего магнитные условия, в которых находится стрелка компаса.

Бруски или шары, применяемые для уничтожения четвертной девиации, создают параметры a_1 и e_1 и, следовательно, оказывают влияние на величину судового коэффициента λ .

Обозначим через λ_0 коэффициент, образуемый только судовым мягким железом, тогда

$$\lambda_0 = 1 + \frac{a_0 + e_0}{2}.$$

Через λ_1 обозначим коэффициент, образуемый брусками или шарами. тогда

$$\lambda_1 = 1 + \frac{a_1 + e_1}{2}.$$

Выведем выражение для суммарного коэффициента λ , образованного совместным действием судового железа и брусков.

В береговых условиях бруски намагничиваются полем H ; образуется коэффициент λ_1 , и величина направляющей силы при этом будет $H_1 = \lambda_1 H$.

Если компас с брусками установлен на судне, бруски будут намагничиваться магнитным полем $H_0 = \lambda_0 H$, так как судовое железо образовало коэффициент λ_0 . Следовательно, суммарное значение направляющей силы будет определяться выражением

$$\lambda_1 H_0 = \lambda_1 (\lambda_0 H) = \lambda_1 \lambda_0 H = \lambda H,$$

откуда находим, что суммарный коэффициент

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_0.$$

На рис. 72 приведена схема образования коэффициентов λ_0 , λ_1 и λ .

Корпус судна находится в магнитном поле Земли (H). В результате намагничивания судовое железо образует коэффициент λ_0 , значит, в пространстве, занимаемом брусками, намагничивающее поле будет иметь величину $H_0 = \lambda_0 H$. Бруски намагничиваются в этом поле и образуют в точке 0 (центр магнитной системы компаса) коэффициент

λ_1 . Коэффициент λ_1 определяет величину направляющей силы H_1 в точке O , т. е. показывает, во сколько раз напряженность H_1 магнитного поля брусков в рассматриваемой точке больше (или меньше) напряженности намагничивающего поля $H_0 = \lambda_0 H$:

$$\frac{H_1}{H_0} = \frac{\lambda_1 H_0}{H_0} = \frac{\lambda_1 \lambda_0 H}{\lambda_0 H} = \lambda_1.$$

Если ввести значение суммарного коэффициента λ и обозначить через этот коэффициент направляющую силу $H_1 = \lambda H$, будем иметь

$$\lambda_1 = \frac{H_1}{H_0} = \frac{\lambda H}{\lambda_0 H} = \frac{\lambda}{\lambda_0},$$

откуда

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_0.$$

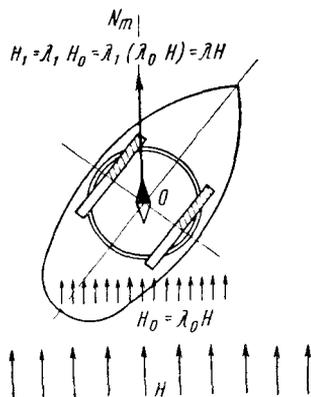


Рис 72

Величина суммарного коэффициента λ при постоянной величине λ_0 зависит от коэффициента λ_1 и будет различна при различных видах компенсаторов четвертной девиации. Некоторые компенсаторы образуют коэффициент λ_1 , величина которого больше единицы. Такие компенсаторы увеличивают суммарный коэффициент λ , т. е. улучшают магнитные условия работы компаса. Другие компенсаторы создают коэффициенты λ_1 , величина которого меньше единицы, и суммарный коэффициент λ уменьшается. Компенсаторы, увеличивающие коэффициент λ , рекомендуется устанавливать на компасах, работающих в тяжелых магнитных условиях, когда величина судового коэффициента λ_0 мала (0,4—0,6).

Рассмотрим каким образом бруски и шары влияют на величину суммарного коэффициента λ .

Продольные бруски, как уже было рассмотрено, образуют отрицательный параметр a_1 (параметр $e = 0$). Собственный коэффициент продольных брусков равен следующему значению, меньшему единицы:

$$\lambda_1 = 1 + \frac{(-a_1) + (0)}{2} = 1 - \frac{a_1}{2}; \quad \lambda_1 < 1.$$

Следовательно, продольные бруски уменьшают суммарный коэффициент, т. е.

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_0; \quad \lambda_1 < 1; \quad \lambda < \lambda_0.$$

Поперечные бруски образуют положительный параметр e_1 (параметр $a_1 = 0$). Коэффициент λ_1 от поперечных брусков, очевидно, будет больше единицы, так как в этом случае имеем:

$$\lambda_1 = 1 + \frac{(0) + (e_1)}{2} = 1 + \frac{e_1}{2}; \quad \lambda_1 > 1.$$

Таким образом, установка поперечных брусьев предпочтительнее, когда судовой коэффициент λ_0 невелик. Следовательно, установка поперечных брусьев в некоторой степени увеличивает суммарный коэффициент за счет коэффициента λ_1 , который больше единицы.

Шары образуют два параметра: $-a_1$ и $+e_1$, причем $|e_1| = |2a_1|$. Коэффициент от шаров

$$\lambda_1 = 1 + \frac{(-a_1) + (+e_1)}{2} = 1 + \frac{a_1}{2}; \quad \lambda_1 > 1.$$

При установке шаров, так же как и поперечных брусьев, величина суммарного коэффициента λ несколько увеличивается.

Расчеты показывают, что уменьшение коэффициента λ_0 при установке продольных брусьев может достигать 10—12%.

§ 33. ДЕВИАЦИЯ ОТ ИНДУКЦИИ

Бруски и шары, предназначенные для уничтожения четвертной девиации, располагают на нактоузе в непосредственной близости от магнитных стрелок компаса. Вследствие этого бруски (шары), помимо основной намагниченности, обусловленной магнитным полем Земли, приобретают дополнительный магнетизм от влияния магнитного поля стрелок катушки компаса. Этот дополнительный магнетизм в свою очередь действует на катушку компаса и отклоняет ее от магнитного меридиана. Такое отклонение называется *девиацией от индукции*.

Рассмотрим индукцию магнитной стрелки компаса на различные виды компенсаторов четвертной девиации.

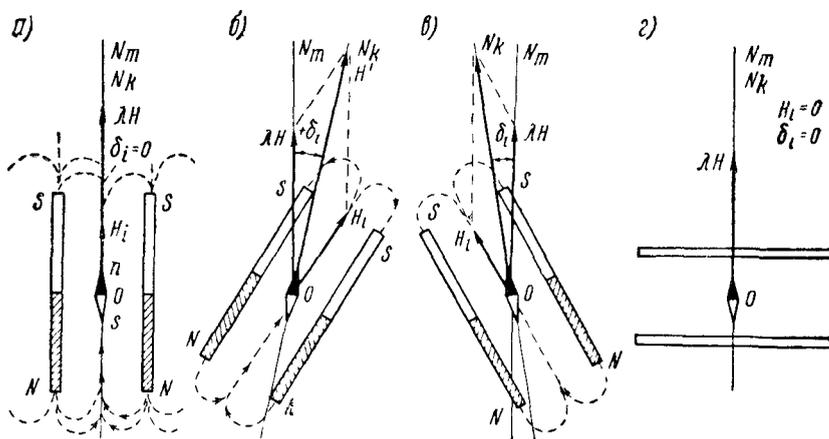


Рис. 73

На рис. 73 изображены продольные бруски. Намагниченность брусьев от индукции магнитной стрелки определяется следующим образом: в том конце бруска, который ближе к северному полюсу стрелки

n , образуется южный полюс S , в противоположном конце бруска, расположенном ближе к южному полюсу стрелки s , образуется северный полюс N . При изменении курса судна бруски изменяют свое положение относительно полюсов стрелки, и полярность брусков при этом меняется (бруски перемагничиваются). Вследствие этого отклонение стрелки от магнитного влияния брусков, намагниченных этой стрелкой, будет проявляться по-разному, в зависимости от курса судна.

На рис. 73 показаны четыре возможных варианта расположения брусков относительно магнитной стрелки в зависимости от курса судна. Как видим (см. рис. 73, a и z), девиация от индукции δ_i на главных компасных курсах судна N, S, E, W равна нулю. Это, очевидно, в рав-

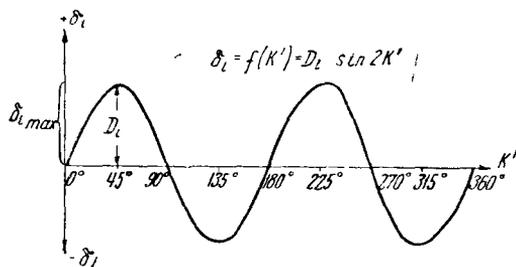


Рис. 74

ной мере относится и к продольным, и к поперечным брускам. На курсах судна в NE и SW четвертях, когда бруски расположены, как показано на рис. 73, b , девиация от индукции положительна (стрелка отклоняется вправо от магнитного меридиана). На курсах судна в SE и NW четвертях (рис. 73, e) девиация от индукции отрицательна (стрелка отклоняется влево). Отклонение стрелки обусловлено действием силы индукции H_i .

Если зависимость девиации δ_i показать в виде графика $\delta_i = f(k')$, можно убедиться, что девиация от индукции имеет четвертной характер: четыре раза δ_i имеет экстремальное значение и четыре раза $\delta_i = 0$ (рис. 74).

Максимальное значение девиации от индукции ($\delta_{i \max}$), наблюдаемое на четвертных компасных курсах, называется *приближенным коэффициентом индукции* и обозначается через D_i . Зависимость девиации δ_i от курса судна, показанная на рис. 74, имеет следующий вид:

$$\delta_i = D_i \sin 2k'.$$

Приближенный коэффициент индукции D_i может быть выражен в градусах или радианах. Для точных расчетов применяют *точный коэффициент индукции* D'_i , равный синусу максимальной девиации:

$$D'_i = \sin \delta_{i \max}.$$

При небольших значениях девиации от индукции (менее 6°) можно принимать

$$D'_i = D_i.$$

Коэффициент индукции D_i может быть положительным или отрицательным в зависимости от расположения и формы мягкого железа нактоуза. Коэффициент индукции будет положительным, если девиация δ_i на курсе NE имеет знак плюс. Если на этом курсе она имеет знак минус, то коэффициент индукции будет отрицательным¹.

Продольные бруски образуют положительный коэффициент индукции ($+D_i$). Это видно из рис. 73.

Установим, какого знака коэффициент индукции создают поперечные бруски, изображенные на рис. 75. Девиация δ_i от поперечных брусков на курсе NE имеет знак минус. Значит, *поперечные бруски образуют отрицательный коэффициент индукции* — D_i .

При уничтожении четвертной девиации от сил $D_0^* \lambda H$ и $E_0^* \lambda H$ бруски, как это было установлено выше, поворачиваются на некоторый угол α относительно диаметральной плоскости. Абсолютное значение максимальной девиации от индукции при повороте брусков не изменяется, остается неизменной и величина коэффициента индукции. Но максимальное значение δ_i при этом наблюдается не на компасных курсах 45, 135, 225 и 315°, сдвигается на величину угла поворота α . Соответственно сдвигаются на угол α и значения $\delta_i = 0$.

На рис. 76 изображен график зависимости δ_i от компасного курса судна (k'), когда продольные горизонтальные бруски повернуты на некоторый угол α относительно диаметральной плоскости. Этот график, аналогичный графику, изображенному на рис. 74 может быть построен путем определения девиации с помощью последовательных схем, показанных на рис. 73. Угол поворота α характеризует сдвиг фазы. Если максимальное значение девиации от индукции $\delta_{i\max}$, наблюдаемое на курсе $k' = 45^\circ + \alpha$, обозначить через $S_{i\max}$, то зависимость δ от курса судна будет иметь вид:

$$\delta_i = S_i \sin 2(k' + \alpha). \quad (112)$$

Это выражение можно преобразовать:

$$\begin{aligned} \delta_i &= S_i \sin (2k' + 2\alpha) = S_i^* \sin 2k' \cos 2\alpha + S_i \cos 2k' \sin 2\alpha = \\ &= D_i \sin 2k' + E_i \cos 2k'. \end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned} D_i &= S_i \cos 2\alpha; \\ E_i &= S_i \sin 2\alpha. \end{aligned} \quad (113)$$

¹ На основании зависимости (58) имеем:

$$D_i = \frac{\frac{1}{2}(\delta_{NE} + \delta_{SW}) - \frac{1}{2}(\delta_{SE} + \delta_{NW})}{2}.$$

Суммарный коэффициент индукции

$$S_i = \sqrt{D_i^2 + E_i^2}.$$

Выражения (113) дают возможность сделать следующие выводы относительно образования коэффициентов индукции.

1. Бруски, установленные продольно относительно судна ($\alpha = 0$), образуют:

$$D_i = +S_i; \quad (D_i > 0); \quad E_i = 0.$$

2. Бруски, установленные в поперечной плоскости судна ($\alpha = \pm 90^\circ$), образуют:

$$D_i = +S_i \cos(\pm 180^\circ) = -S_i; \quad (D_i < 0); \quad E_i = 0.$$

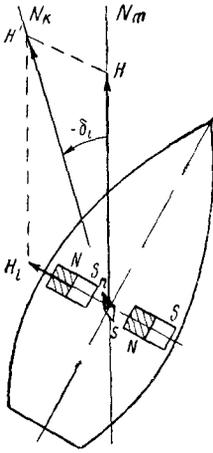


Рис. 75

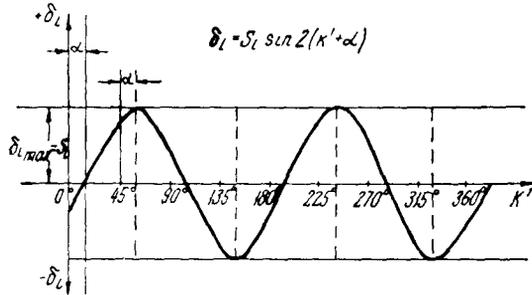


Рис. 76

3. Бруски, повернутые на некоторый угол ($\alpha < 45^\circ$) по часовой стрелке относительно диаметральной плоскости (α — положительно), создают:

$$\begin{aligned} D_i &= +S_i \cos 2\alpha; & (D_i > 0) \\ E_i &= +S_i \sin 2\alpha; & (E_i > 0) \end{aligned}$$

4. Бруски, повернутые на угол α против часовой стрелки ($\alpha < 45^\circ$; α — отрицательно), создают:

$$\begin{aligned} D_i &= +S_i \cos(-2\alpha) = +S_i \cos 2\alpha; & (D_i > 0) \\ E_i &= +S_i \sin(-2\alpha) = -S_i \sin 2\alpha; & (E_i < 0) \end{aligned}$$

5. Бруски повернуты на угол $\alpha = 45^\circ$, тогда, очевидно, возможны два варианта:

1) поворот по часовой стрелке ($\alpha = +45^\circ$):

$$\begin{aligned} D_i &= 0; \\ E_i &= +S_i \quad (E_i > 0); \end{aligned}$$

2) поворот против часовой стрелки ($\alpha = -45^\circ$)

$$\begin{aligned} D_i &= 0; \\ E_i &= -S_i; \quad (E_i < 0). \end{aligned}$$

Шары из мягкого железа, установленные в поперечной плоскости, образуют отрицательный коэффициент индукции $-D_i$, что объясняется преобразующим влиянием поперечного намагничивания шаров.

Как показывают наблюдения, величина коэффициента индукции D_i , а также и E_i прямо пропорциональна магнитному моменту стрелок компаса M_0 и обратно пропорциональна направляющей силе λH . Коэффициент индукции может быть выражен следующей зависимостью¹:

$$D_i = K \frac{M_0}{\lambda H}, \quad (114)$$

где K — множитель, зависящий от размеров, магнитной восприимчивости материала и удаления бруска от стрелок компаса.

Формула (114) показывает, что коэффициент индукции изменяет величину с переменной горизонтальной составляющей земного магнитного поля H . Это является большим неудобством, так как при переходе судна из одного района плавания в другой будет наблюдаться заметное изменение девиации. Чтобы этого не было, девиацию от индукции необходимо тщательно уничтожать.

Рассмотрим, как изменится коэффициент индукции D_i , а следовательно, и четвертная девиация при изменении магнитного поля Земли, если после компенсации индукции все же остался значительной величины коэффициент индукции, например $D_i = 1^\circ$. Пусть судно совершило переход из одного района, где $H_1 = 0,3$ э, в другой район, где $H_2 = 0,06$ э.

На основании формулы (114) можно написать:

$$D_{i_1} = \frac{KM_0}{\lambda H_1}; \quad D_{i_2} = \frac{KM_0}{\lambda H_2};$$

$$D_{i_1} = 1^\circ, 0; \quad H_1 = 0,3 \text{ э}; \quad \frac{KM_0}{\lambda} = D_{i_1} \cdot H_1 = 0,3 \text{ град} \cdot \text{э};$$

$$D_{i_2} = \frac{0,3 \text{ град} \cdot \text{э}}{0,06 \text{ э}} = 5^\circ, 0.$$

Как видим, при уменьшении горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в пять раз коэффициент индукции увеличился в пять раз. Очевидно, чем меньше первоначальное значение коэффи-

¹ Девиация от индукции обычно характеризуется коэффициентом D_i , так как коэффициент E_i для большинства практических случаев (α менее 10°) можно принимать равным нулю.

циента D_{i_2} , тем меньше абсолютная величина коэффициента D_{i_2} . Последнее означает, что чем тщательнее произведена компенсация индукции, тем меньшие изменения получает коэффициент D_{i_2} при плавании судна в районах с меньшей величиной силы H .

§ 34. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И УНИЧТОЖЕНИЕ ДЕВИАЦИИ ОТ ИНДУКЦИИ

В настоящее время девиация от индукции уничтожается при помощи специальных *индукционных пластин*. Эти пластины, изготовляемые из мягкого железа, устанавливаются внутри нактоуза под котелком компаса.

Принцип уничтожения индукции заключается в следующем. Как уже было рассмотрено, продольные бруски образуют положительный коэффициент индукции $+D_i$, а поперечные — отрицательный $-D_i$. Одновременной установкой продольных и поперечных брусков можно добиться такого положения, что суммарный коэффициент индукции будет равен нулю:

$$D_i = (+D_{i \text{ прод}}) + (-D_{i \text{ попер}}) = 0.$$

Исходя из этого, девиация от индукции при установке продольных брусков уничтожается поперечными индукционными пластинами. Если же компас снабжен поперечными брусками, то пластины устанавливают продольно. Иначе говоря, бруски для уничтожения четвертной девиации и индукционные пластины должны располагаться взаимно перпендикулярно.

Компенсация индукции при помощи пластин производится в береговых условиях одновременно с уничтожением четвертной девиации. Для этого прежде всего определяют величину коэффициента индукции. Положим, что уничтожаем четвертную девиацию продольными брусками. Поскольку при береговых наблюдениях бруски всегда устанавливают строго продольно, то такие наблюдения позволяют определить коэффициент $D_i = S_i$, а коэффициент E_i при этом равен нулю. Для уничтожения девиации от индукции достаточно произвести компенсацию коэффициента D при продольном положении брусков (угол $\alpha = 0$). Если после этого шейку нактоуза с брусками потребуется повернуть на судне на некоторый угол α , чтобы компенсировать девиацию от силы $E'_i \lambda H$, девиация от индукции проявляться не будет, так как при развороте шейки вместе с брусками на тот же угол повернутся и пластины и компенсация индукции, выполненная в береговых условиях, не будет нарушена. Иначе говоря, можно ограничиться рассмотрением компенсации только коэффициента индукции D_i .

Для определения коэффициента индукции применяют компас с так называемой «легкой» картушкой, предложенной В. Я. Павлиновым. Эта картушка имеет очень незначительный (порядка 100 ед. СГСМ) магнитный момент M_0 , благодаря чему индукция ее стрелок на окружающее железо практически равна нулю.

Величина коэффициента индукции D_i может быть вычислена как разность между коэффициентом D_* , наблюдаемым с картушкой су-

дового компаса, и коэффициентом D_1 , наблюдаемым с «легкой» картушкой:

$$D_i = D_* - D_1. \quad (115)$$

Для определения коэффициента индукции D_i необходимо проделать следующую работу.

1. Установить нактоуз компаса¹ на поворотную платформу (на берегу) и снабдить его надлежащими компенсаторами (продольные или поперечные бруски или шары). Поместить в нактоузе обыкновенный (судовой) котелок компаса² и взять компасные пеленги отдаленного предмета на четырех четвертных компасных курсах. Вычислить коэффициент D_* по формуле

$$D_* = \frac{\frac{1}{2}(K\Pi_{SE} + K\Pi_{NW}) - \frac{1}{2}(K\Pi_{NE} + K\Pi_{SW})}{2}. \quad (116)$$

2. Заменить судовой котелок специальным котелком с легкой картушкой и взять на четырех компасных курсах пеленги того же самого (или другого) отдаленного предмета. По формуле (116) вычислить коэффициент D_1 .

3. Рассчитать коэффициент индукции установленных брусков (шаров) по формуле (115). После того как определена величина коэффициента D_i , приступают к уничтожению индукции. Работа по уничтожению индукции сводится к тому, чтобы подобрать одну или несколько индукционных пластин соответствующего размера (в зависимости от величины коэффициента D_i) и установить эти пластины под котелком компаса. Пластины крепятся к специальной площадке, расположенной под котелком.

Если коэффициент индукции положительный ($+D_i$), индукционные пластины устанавливаются в поперечной плоскости компаса. Если коэффициент индукции отрицательный ($-D_i$), пластины располагают продольно.

После установки пластин производится повторное (контрольное) определение коэффициента индукции, образованного совместным действием брусков (шаров) и пластин³.

Если контрольное определение покажет, что коэффициент индукции $D_i = (+D_{iбр}) + (-D_{iпл})$ все еще имеет значительную величину (более $0^\circ, 2$), необходимо установить другие пластины соответственно большего или меньшего размера.

Так, последовательными действиями необходимо добиться, чтобы остаточный коэффициент индукции после установки пластин был не

¹ Для этой работы можно устанавливать на поворотную платформу не весь нактоуз, а только его верхнюю часть — «шейку» нактоуза.

² Обыкновенный, или судовой, котелок компаса имеет картушку, магнитный момент которой $M_0 \geq 1500$ ед. СГСМ.

³ Обычно пластины устанавливаются без предварительного определения D_i и сразу приступают к контрольному определению остаточного коэффициента индукции.

более 0°, 2. Компенсация индукции производится совместно с уничтожением четвертной девиации.

Работа по уничтожению девиации от индукции при помощи пластин является весьма трудоемкой и требует большого навыка, что является значительным недостатком данного способа. Удобнее в обращении и надежнее в работе был бы такой магнитный компас, у которого мягкое железо, предназначенное для уничтожения четвертной девиации, не проявляло бы отклоняющего индукционного действия на компасные стрелки.

Описание нового способа уничтожения четвертной девиации при помощи безындукционных компенсаторов приводится в § 36 настоящего учебника.

§ 35. ПОРЯДОК РАБОТЫ ПРИ УНИЧТОЖЕНИИ ЧЕТВЕРТНОЙ ДЕВИАЦИИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ИНДУКЦИИ ПРИ ПОМОЩИ ПЛАСТИН

Прежде чем приступить к уничтожению четвертной девиации от судовых сил $D_0' \lambda H$ и $E_0' \lambda H$, необходимо определить судовые коэффициенты D_0 и E_0 . Эти коэффициенты определяют на девиационном рейде после уничтожения полукруговой девиации. Для этого необходимо взять на восьми компасных курсах пеленги отдаленного предмета или створа и произвести вычисление по формулам¹:

$$D_0 = \frac{\frac{1}{2} (KP_{SE} + KP_{NW}) - \frac{1}{2} (KP_{NE} + KP_{SW})}{2};$$

$$E_0 = \frac{\frac{1}{2} (KP_E + KP_W) - \frac{1}{2} (KP_N + KP_S)}{2}.$$

Дальнейшая работа выполняется в следующей последовательности.

1. Связят компас (или шейку компаса) на берег и устанавливают его на поворотное приспособление.

2. Вычисляют величину коэффициента D_1 , соответствующую углу поворота α , равному нулю:

$$D_1 = \sqrt{D_0^2 + E_0^2} \quad (\alpha=0)$$

3. По величине D_1 (при помощи специальной таблицы, например табл. 13 «Девиационных таблиц») подбирают бруски или шары соот-

¹ При определении судовых коэффициентов D_0 и E_0 мягкое железо компаса (бруски, шары, пластины) должно быть убрано. Можно также вычислить судовые коэффициенты D_0 и E_0 , если из наблюдений известны суммарные коэффициенты D и E , а также D_1 и E_1 , образованные брусками:

$$D_0 = D - D_1; \quad E_0 = E - E_1.$$

ветствующих размеров и устанавливают их на компасе вместе с индукционными пластинами.

4. При помощи легкой картушки определяют коэффициент D_1 ($\alpha=0$).

Если при этом будет обнаружено, что выбранные бруски (шары) дают коэффициент D_1 по величине меньше или больше расчетного, размер брусков (шаров) соответственно увеличивают или уменьшают. Разность между расчетным и действительным значениями D_1 не должна превышать $0,3-0^{\circ},4$.

5. Подобрать окончательные размеры брусков (шаров), производят компенсацию индукции, как было описано в § 34. Остаточный коэффициент индукции D_i должен быть не более $0^{\circ},2$.

6. Компас (или шейку компаса) с установленными брусками перевозят на судно.

7. Разворачивают шейку компаса вместе с брусками на угол α ; величина угла α определяется из выражения:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{E_0}{D_0}.$$

Поворот производят по часовой стрелке, когда судовой коэффициент E_0 отрицательный, и наоборот.

На этом уничтожение четвертной девиации заканчивается. После уничтожения четвертной девиации производят уничтожение креновой и полукруговой девиации.

Рассмотрим уничтожение четвертной девиации на следующем примере.

На новом судне установили магнитный компас. Необходимо произвести уничтожение всех видов девиации и в первую очередь уничтожить четвертную девиацию.

Выходим на девиационный рейд, подуничтожаем креновую и полукруговую девиации. Для определения коэффициентов D_0 и E_0 берем компасные пеленги створа на восьми компасных курсах. Данные наблюдений и расчеты сводим в табл. 14.

Определив судовые коэффициенты D_0 и E_0 , свозим на берег шейку компаса и устанавливаем ее на поворотное приспособление. Вычисляем величину коэффициента D_1 :

$$D_1 = \sqrt{D_0^2 + E_0^2} = \sqrt{23,04 + 2,56} = \sqrt{25,6} \approx 5^{\circ},1$$

Таблица 14

КК	КП	КК	КП	КК	КП	КК	КП
SE	134°,2	NE	125°,6	Е	135°,6	N	138°,8
NW	135°,4	SW	124°,8	W	134°,8	S	138°,0
Средн. I	134°,8	Средн. II	125°,2	Средн. I	135°,2	Средн. II	138°,4
II	125°,2		--	II	136°,8		
I—II	+9,6	$D_0 =$ $=+4^{\circ},8$	--	I—II	-3,2	$E_0 =$ $=-1^{\circ},6$	

По величине $D_1 = 5,1$ при помощи табл. 13 «Девиационных таблиц» подбираем два продольных бруска длиной 30 см и две поперечные пластины; устанавливаем эти бруски с пластинами на компасе. Помещаем в компас котелок с легкой картушкой и берем четыре компасных пеленга отдаленного предмета. Определяем коэффициент D_1 , образуемый брусками с пластинами. Расчет производим по схеме (табл. 15).

Коэффициент D_1 получился больше расчетного на $0^\circ, 5$. Уменьшаем длину брусков на 2 см. Снова определяем коэффициент D_1 . Получаем следующие данные (табл. 16).

Таблица 15
Котелок с легкой картушкой

КК	КП	КК	КП
SE	28°,2	NE	39°,6
NW	27,9	SW	38,8
I	28,0	II	39,2
II	39,2	—	—
I—II	-11,2	$D_1 =$ $= -5^\circ,6$ ($\alpha = 0$)	—

Таблица 16
Котелок с легкой картушкой

КК	КП	КК	КП
SE	27°,8	NE	38°,4
NW	27,4	SW	37,6
I	27,6	II	38,0
II	38,0	—	—
I—II	-10,4	$D_1 =$ $= -5^\circ,2$ ($\alpha = 0$)	—

Коэффициент $D_1 = -5^\circ,2$ по абсолютной величине отличается от расчетного всего на $0^\circ,1$.

Подбор брусков закончен. Приступаем к определению и уничтожению индукции.

Помещаем в компас обыкновенный котелок и берем четыре компасных пеленга для определения коэффициента D_* . Наблюдения и расчет записываем в таблицу (табл. 17).

Рассчитываем остаточный коэффициент индукции:

$$D_i = D_* - D_1 = (-5^\circ,8) - (-5^\circ,2) = -0^\circ,6.$$

Величина коэффициента индукции весьма значительна. Его отрицательный знак говорит о том, что индукционные пластины имеют размеры большие, чем необходимо. Уменьшаем немного их длину. Повторяем наблюдения (табл. 18)¹.

Определяем коэффициент индукции:

$$D_i = D_* - D_1 = (-5^\circ,3) - (-5^\circ,2) = -0^\circ,1.$$

¹ Повторять наблюдения достаточно только с обыкновенным котелком, так как величина D_1 при изменении длины пластин практически остается постоянной.

Величина коэффициента индукции достаточно мала. Уничтожение девиации от индукции закончено.

Шейку компаса с брусками и пластинами перевозим на судно и устанавливаем на место. Рассчитываем угол поворота брусков относительно диаметральной плоскости:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{-E_0}{+D_0} = \frac{-1,6}{+4,8} = -0,333;$$

$$2\alpha = -18^{\circ},5; \quad \alpha = -9^{\circ},2.$$

Таблица 17
Обыкновенный котелок

КК	КП	КК	КП
SE	48°,2	NE	60°,4
NW	48,6	SW	59,6
I	48,4	II	60,0
II	60,0	$D_* =$	—
I—II	—11,6	$= -5^{\circ},8$	—

Таблица 18
Обыкновенный котелок

КК	КП	КК	КП
SE	48°,1	NE	59°,0
NW	48,5	SW	58,8
I	48,3	II	58,9
II	58,9	$D_* =$	—
I—II	—10,6	$= -5^{\circ},3$	—

Отрицательный знак угла α говорит о том, что поворот брусков следует производить против часовой стрелки. Поворачиваем шейку компаса вместе с брусками и пластинами на угол $9^{\circ},2$ против часовой стрелки. Пружинный подвес компаса разворачиваем на тот же угол в противоположную сторону. Уничтожение четвертной девиации закончено.

§ 36. УНИЧТОЖЕНИЕ ЧЕТВЕРТНОЙ ДЕВИАЦИИ ПРИ ПОМОЩИ «БЕЗЫНДУКЦИОННЫХ» КОМПЕНСАТОРОВ

Как было установлено в § 34, компенсация индукции при помощи специальных пластин значительно усложняет работу по уничтожению четвертной девиации, так как для этого требуется свозить компас с судна на берег. Сама операция подбора пластин надлежащего размера занимает много времени и требует большого навыка.

Исследования показали, что уничтожить девиацию от индукции можно другим способом — установкой «безындукционных» компенсаторов для уничтожения четвертной девиации.

«Безындукционность», т. е. отсутствие девиации от индукции, обеспечивается рациональными размерами компенсаторов, что объясняется следующим образом. Пусть брусок из мягкого ферромагнитного материала произвольного сечения (например, круглого), имеющий длину l и площадь поперечного сечения s , установлен около компаса горизонтально на уровне картушки на некотором расстоянии r от ее центра (рис. 77). Будем рассматривать намагниченность бруска, образованную только полем магнитной системы (стрелки) компаса т. е. индуктивную намагниченность. При поворотах судна брусок вме-

сте с нактоузом поворачивается вокруг точки 0. Намагниченность бруска при этом меняется. Будем характеризовать намагниченность бруска по продольной оси вектором \bar{M}_1 , а по поперечной оси — вектором \bar{M}_2 . Брусок, получивший намагниченность от стрелки, воздействует на стрелку, образуя в точке 0 (точнее, в объеме занимаемом стрелкой) магнитное поле. Обозначим напряженность поля в точке 0 от продольного магнетизма бруска через H_1 , а от поперечного — через H_2 . Направления векторов \bar{H}_1 и \bar{H}_2 соответственно параллельны направлениям \bar{M}_1 и \bar{M}_2 , если брусок установлен симметрично ($l_1 = l_2 = \frac{l}{2}$). Девиацию от индукции создают силы F_1 и F_2 , являющиеся проекциями векторов H_1 и H_2 по направлению, перпендикулярному магнитному меридиану. Силы F_1 и F_2 , обусловленные продольным и поперечным индуктивным магнетизмом, всегда направлены в противоположные стороны. Брусок будет безындукционным, т. е. он не будет создавать девиацию от индукции, если силы F_1 и F_2 численно равны между собой. Величины сил F_1 и F_2 зависят соответственно от продольного и поперечного размеров бруска. При определенном соотношении длины l и диаметра d бруска наступает равенство сил

$$F_1 = F_2$$

и брусок становится безындукционным. Отношение длины к диаметру называется *относительной длиной* и обозначается

$$\Lambda = \frac{l}{d}.$$

Величина Λ , при которой брусок становится безындукционным, зависит от объема бруска, его удаления от центра стрелки и магнитной восприимчивости материала. Расчеты показывают, что при удалении $r = 13—15$ см безындукционность обеспечивается относительной длиной $\Lambda = 3,0—3,6$. Точное значение Λ для любого заданного объема бруска находится экспериментально.

Применение безындукционных брусков значительно упрощает уничтожение четвертной девиации: вся работа может быть выполнена непосредственно на судне, так как отпадает надобность свозить компас на берег для подбора индукционных пластин.

Уничтожение четвертной девиации безындукционным способом выполняется при помощи комплекта специально изготовленных брусков. Комплект состоит из пяти-шести пар брусков различного объема. Каждый из брусков, входящих в комплект, имеет рациональную длину Λ , обеспечивающую полное отсутствие девиации от индукции.

Комплекты безындукционных брусков должны изготавливаться в нескольких вариантах (для судов различных категорий, в зависимости от возможных величин коэффициента D_0).

В качестве примера рассмотрим комплект безындукционных брусков, предназначенный для уничтожения четвертной девиации при значениях коэффициента D_0 от $0^\circ,5$ до $6^\circ,0$.

Таблица 19

№ бруска	D_1	$l, \text{ см}$	$d, \text{ см}$	$\Lambda = \frac{l}{d}$	$v = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l, \text{ см}^3$
1	$-0^\circ,7$	10,2	3,3	3,10	87,2
2	$-1^\circ,2$	11,8	3,9	3,03	140
3	$-1^\circ,6$	14,5	4,3	3,40	210
4	$-2^\circ,2$	15,4	4,7	3,28	266
5	$-2^\circ,9$	18,0	5,0	3,60	358

Пр и м е ч а н и е. Коэффициент D_1 указан для одиночного бруска при расстоянии до центра картушки $r = 15,5 \text{ см}$. Материал бруска — судостроительная сталь.

Комплект состоит из пяти пар брусков круглого сечения. В табл. 19 даны основные характеристики безындукционных брусков. На торцевой части указывается номер бруска и величина коэффициента D_1 , создаваемого бруском.

Чтобы произвести уничтожение четвертной девиации, необходимо выбрать один или два бруска из комплекта и установить их в кронштейнах компаса. Бруски подбирают в зависимости от величины судового коэффициента D_0 . Комплект брусков, приведенный в табл. 19, позволяет компенсировать любой по величине коэффициент D_0 от $0^\circ,5$ до $6^\circ,0$ с точностью $\pm 0^\circ,2$.

Пример. Судовой коэффициент $D_0 = +2^\circ,7$. Пользуясь табл. 19, подбираем два бруска—№ 2 и № 3. Они образуют коэффициент $D_1 = -1^\circ,2 - 1^\circ,6 = -2^\circ,8$. После установки брусков остаточный (суммарный) коэффициент

$$D = D_1 + D_0 = -2^\circ,8 + 2^\circ,7 = -0^\circ,1.$$

Производить уничтожение индукции не требуется, так как бруски безындукционные.

Порядок уничтожения четвертной девиации при наличии безындукционных брусков рекомендуется следующий (все работы выполняются на судне).

1. Подуничтожить полукруговую и креновую девиации.
2. По наблюдениям пеленгов, взятых на четвертных компасных курсах, определить величину судового коэффициента D_0 :

$$D_0 = \frac{\frac{1}{2}(KП_{SE} + KП_{NW}) - \frac{1}{2}(KП_{NE} + KП_{SW})}{2}.$$

3. Руководствуясь значениями коэффициента D_1 , указанными на торцевой части брусков, подобрать один или два бруска, в сумме дающие с точностью до $0^\circ,2$ величину, равную рассчитанному коэффициенту D_0 .

Выбранные бруски (или один брусок) установить в кронштейнах компаса. На этом уничтожение четвертной девиации, вызванной силой $D_0 \lambda H$, заканчивается. Если у компаса наряду с коэффициентом D_0'

наблюдается значительный коэффициент E_0' , то в этом случае подбор брусков производится по величине коэффициента S_0 , полученного по формуле

$$S_0 = \sqrt{D_0^2 + E_0'^2},$$

причем значения D_0 и E_0 определяются из наблюдений компасных пеленгов и рассчитываются, как указано выше.

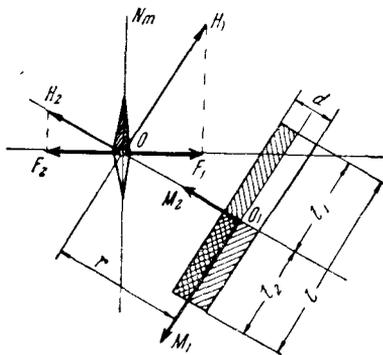


Рис. 77

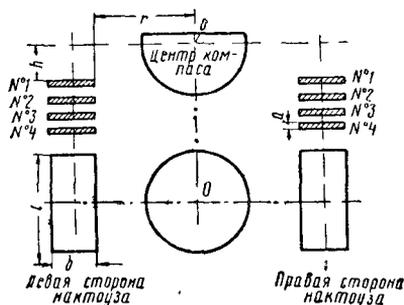


Рис. 78

После установки брусков шейку нактоуза разворачивают на угол α . Величину угла α определяют по формуле

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{E_0}{D_0}.$$

После уничтожения четвертной девиации, как обычно, уничтожают полукруговую и креновую девиации и определяют остаточную ее величину.

В качестве безындукционных компенсаторов четвертной девиации могут применяться не только бруски круглого сечения, но также прямоугольные бруски и даже пластины. Прямоугольные бруски и пластины небольшой толщины, имеющие определенное отношение длины к ширине, устанавливают так же, как и круглые бруски, по бокам шейки нактоуза. При незначительной толщине они почти не имеют вертикального намагничивания и, следовательно, создают меньшую, чем круглые бруски, креновую девиацию. С этой точки зрения компенсаторам четвертной девиации предпочтительнее придавать такую форму, чтобы вертикальные размеры были наименьшими.

Таблица 20

D_1	№ устанавливаемых пластин	
	Левая сторона нактоуза	Правая сторона нактоуза
$-1^{\circ},5$	2	—
$-2^{\circ},2$	—	1, 3
$-3^{\circ},0$	2	2
$-3^{\circ},7$	2	1, 3
$-4^{\circ},6$	1, 2	1, 2
$-5^{\circ},0$	1, 2, 3	1, 2, 3
$-5^{\circ},8$	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4

На рис. 78 показано расположение безындукционных компенсаторов, имеющих форму прямоугольных пластин, устанавливаемых в верхней части нактоуза.

В результате экспериментального исследования установлены следующие наиболее рациональные параметры безындукционных компенсаторов:

размеры пластин $l = 252$, $b = 75$, $a = 3$ мм;
установочные данные $r = 147$, $h = 56$, $f = 10$ мм.

При этих параметрах таблица для практического уничтожения четвертной девиации с помощью безындукционных пластин имеет следующий вид (табл. 20).

Лабораторные и судовые испытания показали, что безындукционные компенсаторы четвертной девиации в виде прямоугольных пластин имеют ряд преимуществ: они более компактны, имеют незначительный вес и, главное, не создают креновой девиации.

Глава VIII

ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЕВИАЦИИ

§ 37. ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЕВИАЦИИ

Одним из основных требований, предъявляемых к магнитному компасу, является надежность его показаний, которая определяется неизменностью коэффициентов девиации. Если во время плавания судна по каким-либо причинам изменяются все или отдельные коэффициенты девиации, компас перестает быть надежным курсоуказателем.

Изменение коэффициентов девиации может происходить по различным причинам. В предыдущей главе уже рассматривалось изменение коэффициента индукции D_i . Чтобы выяснить причины изменения других коэффициентов, необходимо проанализировать их выражения.

Рассмотрим коэффициенты полукруговой девиации. Из известных уже нам выражений:

$$\begin{aligned} B' &= \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{Z}{H} + \frac{P}{\lambda H}; \\ C' &= \frac{f}{\lambda} \cdot \frac{Z}{H} + \frac{Q}{\lambda H} \end{aligned} \quad (117)$$

видно, что коэффициенты B' и C' изменяются в зависимости от значений вертикальной Z и горизонтальной H составляющих земного маг-

нитного поля. Изменение этих величин при переходе судна из одного района плавания $H_1; Z_1$ в другой район $H_2; Z_2$ является одной из главных причин непостоянства девиации.

В выражения коэффициентов B' и C' входят также величины P и Q , характеризующие влияние на компас твердого в магнитном отношении судового железа, обладающего постоянным магнетизмом. При уничтоженной полукруговой девиации

$$P = 0; \quad Q = 0.$$

В этом случае изменение полукруговых коэффициентов происходит только за счет изменения первых членов в соотношениях (117). Силы P и Q при плавании судна в обычных условиях, как правило, остаются неизменными. Однако при сильных внешних воздействиях — механических, тепловых, электрических — в результате изменения внутренней структуры железа происходит изменение сил P и Q , и полукруговые коэффициенты B' и C' вследствие этого могут в некоторой степени изменить свою величину. От сотрясений корпуса при посадке на мель или при плавании во льдах, от нагрева корпуса (например, при пожаре), от прохождения сильного тока при электросварочных работах и при некоторых других внешних воздействиях может измениться полукруговая девиация.

Можно считать, что изменения в показаниях компаса в основном происходят за счет непостоянства полукруговых коэффициентов. Что касается четвертной девиации, то обычно считают, что ее изменение происходит только в результате увеличения или уменьшения коэффициентов индукции D'_i и E'_i , которые зависят от горизонтальной составляющей земного магнетизма.

В конце главы будет рассмотрено изменение четвертных коэффициентов D' и E' в результате изменения магнитной восприимчивости мягкого судового железа. Обычно в курсах девиации магнитная восприимчивость χ принимается за постоянную величину. В действительности она является функцией внешнего намагничивающего поля и не остается постоянной при плавании судна.

Одной из причин изменения коэффициентов девиации можно считать явление так называемого полупостоянного магнетизма.

Полупостоянный магнетизм — это изменяющаяся часть постоянного магнетизма, проявляющая себя после спуска судна на воду, при длительном нахождении судна на одном курсе, после длительной стоянки и т. п. Полупостоянный магнетизм со временем уменьшается, магнитное состояние судна стабилизируется. Следует учитывать, что полупостоянный магнетизм полностью не исчезает и при определенных условиях может создавать некоторое изменение коэффициентов полукруговой девиации.

Мы перечислили различные причины, от которых может измениться величина того или другого коэффициента девиации.

Рассмотрим более подробно отдельные вопросы, связанные с изменением девиации.

§ 38. ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛУКРУГОВОЙ ДЕВИАЦИИ ПРИ ПЕРЕМЕНЕ СУДНОМ МАГНИТНОЙ ШИРОТЫ

Полукруговая девиация, появляющаяся от действия сил:

$$B'\lambda H = cZ + P \quad \text{и} \quad C'\lambda H = fZ + Q,$$

уничтожается продольными и поперечными магнитами. Эти магниты создают силы $F_{\text{прод}}$ и $F_{\text{попер}}$.

Предположим, что в данном районе H_1 и Z_1 выполнено уничтожение полукруговой девиации:

$$B'\lambda H_1 = cZ_1 + P + F_{\text{прод}} = 0, \quad C'\lambda H_1 = fZ_1 + Q + F_{\text{попер}} = 0.$$

Силы $F_{\text{прод}}$ и $F_{\text{попер}}$ численно равны:

$$F_{\text{прод}} = -(cZ_1 + P); \quad F_{\text{попер}} = -(fZ_1 + Q).$$

Выражения полукруговых коэффициентов для района плавания, где производилось уничтожение девиации, будут иметь следующий вид:

$$B'_1 = \frac{cZ_1 + P + F_{\text{прод}}}{\lambda H_1} = 0, \quad C'_1 = \frac{fZ_1 + Q + F_{\text{попер}}}{\lambda H_1} = 0.$$

При переходе судна в другой район плавания H_2 , Z_2 в выражениях полукруговых коэффициентов вместо значений H_1 и Z_1 надо подставить величины H_2 и Z_2 . Полукруговые коэффициенты примут вид:

$$B'_2 = \frac{cZ_2 + P + F_{\text{прод}}}{\lambda H_2}, \quad C'_2 = \frac{fZ_2 + Q + F_{\text{попер}}}{\lambda H_2}.$$

Подставив значения $F_{\text{прод}}$ и $F_{\text{попер}}$, убеждаемся, что новые значения полукруговых коэффициентов не равны нулю, т. е. при переходе судна в другой район плавания компенсация полукруговой девиации нарушилась, т. е.:

$$B'_2 = \frac{cZ_2 + P - (cZ_1 + P)}{\lambda H_2} = \frac{c(Z_2 - Z_1)}{\lambda H_2} \neq 0,$$

$$C'_2 = \frac{fZ_2 + Q - (fZ_1 + Q)}{\lambda H_2} = \frac{f(Z_2 - Z_1)}{\lambda H_2} \neq 0.$$

Изменение полукруговых коэффициентов девиации при перемене судном магнитной широты может достигать значительных размеров (порядка 10—20°), особенно при плавании в высоких широтах. Чтобы они оставались неизменными, необходимо устанавливать на нактоузе компаса специальные компенсаторы.

Проанализируем выражения сил, создающих полукруговую девиацию

$$B'\lambda H = cZ + P, \quad C'\lambda H = fZ + Q,$$

где cZ и fZ обусловлены мягким в магнитном отношении железом, а P и Q — твердым.

Как видим, каждая из этих сил состоит из двух компонентов. Первый компонент образуется от влияния мягкого судового железа, приобретающего индуктивный магнетизм от вертикальной составляющей земного поля Z , второй — от влияния твердого, обладающего постоянным магнетизмом.

Чтобы силы $B'\lambda H$ и $C'\lambda H$ после их компенсации не изменяли своих величин, необходимо, очевидно, компенсацию каждой из этих сил производить двумя видами компенсаторов: силы cZ и fZ — вертикальными брусками мягкого железа; силы P и Q — продольными и поперечными постоянными магнитами.

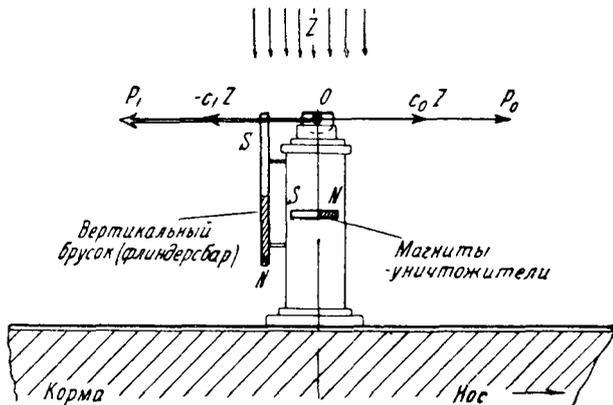


Рис. 79

При таком уничтожении полукруговой девиации двумя видами компенсаторов с переходом судна из одного района плавания в другой полукруговые коэффициенты изменяться не будут. Действительно, пусть в районе H_1 ; Z_1 , где производилось уничтожение девиации, были установлены вертикальные бруски и магниты-уничтожители, дающие соответственно силы c_1Z ; f_1Z ; P_1 и Q_1 , причем эти силы равны по величине соответствующим судовым силам c_0Z ; f_0Z ; P_0 и Q_0 .

Параметры вертикальных брусков c_1 и f_1 равны судовым параметрам c_0 и f_0 , т. е.

$$c_1 = -c_0; f_1 = -f_0.$$

Тогда

$$B'_1 = \frac{c_0 Z_1 + P_0 - (c_1 Z_1 + P_1)}{\lambda H_1} = 0, \quad C'_1 = \frac{f_0 Z_1 + Q_0 - (f_1 Z_1 + Q_1)}{\lambda H_1} = 0.$$

При переходе судна в другой район плавания H_2 ; Z_2 силы P_1 и Q_1 , создаваемые магнитами-уничтожителями, остаются прежними, а силы от вертикальных брусков примут новые значения:

$$c_1 Z_2 \text{ и } f_1 Z_2.$$

Полукруговые коэффициенты при этом останутся неизменными, т. е. будут равны нулю:

$$B'_2 = \frac{c_0 Z_2 + P_0 - (c_1 Z_2 + P_1)}{\lambda H_2} = 0, \quad C'_2 = \frac{f_0 Z_2 + Q_0 - (f_1 Z_2 + Q_1)}{\lambda H_2} = 0.$$

Схема уничтожения полукруговой девиации при помощи вертикальных брусков мягкого железа и магнитов-уничтожителей показана на рис. 79, которым поясняется уничтожение девиации от силы $B'\lambda H$. Для выполнения условия уничтожения девиации от этой силы $B'_0 = -B_1$ применяют продольные магниты-уничтожители, создающие силу $-P_1 = P_0$, и устанавливают вертикальный брусок мягкого железа, образующий силу $-c_1 Z = c_0 Z$. В результате получают равенство

$$c_0 Z + P_0 = (P_1 + c_1 Z)$$

или

$$\frac{c_0 Z + P_0}{\lambda H} = -\frac{P_1 + c_1 Z}{\lambda H},$$

т. е. окончательно

$$B_0 = -B_1.$$

Вертикальный брусок мягкого железа, предназначенный для компенсации переменной части полукруговой девиации, называется *широпным компенсатором*, или *флиндерсбаром*¹.

§ 39. УСТАНОВКА ФЛИНДЕРСБАРА

Обычно сила $f_0 Z$ невелика и не требует компенсации. Поэтому на большинстве судов флиндерсбар устанавливают только для компенсации силы $c_0 Z$, которая у главного компаса создается в основном дымовой трубой и направлена в корму. В этом случае флиндерсбар крепится к передней части нактоуза.

Рассмотрим установку флиндерсбара (рис. 80), предназначенного для компенсации отрицательной судовой силы $-c_0 Z$. Флиндерсбар должен быть установлен так, чтобы равенство

$$c_0 Z = -c_1 Z$$

осталось неизменным при любых значениях Z . Для этого необходимо, чтобы параметр флиндерсбара c_1 численно был равен судовому параметру c_0 .

Величина параметра c_1 зависит от длины флиндерсбара, его диаметра и расстояния до центра картушки компаса. Конструктивно флиндерсбар выполняется в виде набора цилиндрических железных стержней разной длины, что позволяет составить любую длину флиндерсбара

¹ По имени английского капитана Флиндерса, впервые наблюдавшего изменение полукруговой девиации при плавании в Австралию в 1805 г.

ра через один сантиметр. Собранный флиндерсбар помещается в латунном пенале и при помощи двух кронштейнов крепится к нактоузу компаса. Верхний конец флиндерсбара должен находиться примерно на уровне картушки. Из трех величин (диаметр d , длина l и расстояние r), определяющих параметр флиндерсбара, обычно выбирают одну, изменением которой создают необходимое значение c_1 . Такой величиной является длина. Диаметр d и расстояние r остаются постоянными. Для правильного подбора длины флиндерсбара необходимо знать величину c_0 .

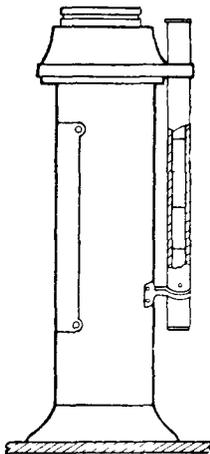


Рис. 80

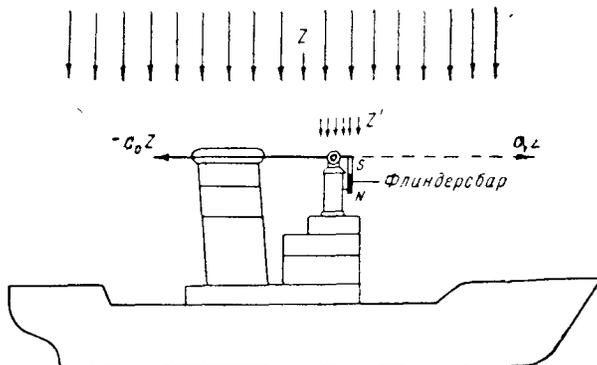


Рис. 81

Если считать, что судовое вертикальное железо и флиндерсбар намагничиваются одной и той же силой Z земного магнетизма, то величина $-c_1 = +c_0$, что ясно из выражения $c_0 Z = -c_1 Z$.

В действительности флиндерсбар, установленный на судне, намагничивается не силой Z , а силой Z' , которая определяется третьим уравнением Пуассона

$$Z' = Z + g_0 X + h_0 Y + k_0 Z + R_0.$$

Здесь следует заметить, что флиндерсбар, намагниченный силами $g_0 X$ и $h_0 Y$, входящими в это уравнение, создает не полукруговую, а четвертную девиацию. Действительно, в результате намагничивания вертикальными силами:

$$g_0 X = g_0 H \cos k, \quad h_0 Y = h_0 H \sin k$$

флиндерсбар образует в центре картушки компаса силы: продольную F_1 и поперечную F_2 , которые определяются следующими зависимостями:

$$F_1 = a_0 (g_0 H \cos k), \quad F_2 = e_0 (h_0 H \sin k).$$

Обозначим

$$a_0 g_0 = m_0 \quad \text{и} \quad e_0 h_0 = n_0,$$

тогда

$$F_1 = m_0 H \cos k, \quad F_2 = n_0 H \sin k.$$

Девияция от силы F_1 , как от продольной силы, определяется выражением

$$\delta_1 = \frac{F_1}{\lambda H} \sin k,$$

а девияция от силы F_2

$$\delta_2 = \frac{F_2}{\lambda H} \cos k.$$

Подставляя значения F_1 и F_2 , получаем выражения

$$\delta_1 = \frac{m_0}{2\lambda} \sin 2k, \quad \delta_2 = \frac{n_0}{2\lambda} \cos 2k,$$

показывающие, что от намагничивания силами $g_0 X$ и $h_0 Y$ флиндерсбар создает четвертную девияцию. Поскольку флиндерсбар предназначен для уничтожения полукруговой девияции, действие сил $g_0 X$ и $h_0 Y$ можно не рассматривать. Поэтому будем считать, что флиндерсбар создает необходимый эффект в результате намагничивания силой

$$Z' = Z + k_0 Z + R_0.$$

Намагниченный в поле Z' флиндерсбар образует в центре компаса силу $c_1 Z'$, величина которой должна быть равна судовой силе $c_0 Z$ (рис. 81), т. е.:

$$c_1 Z' = -c_0 Z; \quad c_1 Z' = c_1 (Z + k_0 Z + R_0) = c_1 (1 + k_0) Z + c_1 R_0.$$

Величина $c_1 R_0$ как постоянная продольная сила войдет в состав судовой силы P_0 и будет компенсирована продольными магнитами-уничтожителями при уничтожении полукруговой девияции после установки широтного компенсатора. Значит, флиндерсбар создает силу

$$c_1 Z' = c_1 (1 + k_0) Z,$$

которая равна силе $c_0 Z$.

Следовательно,

$$c_1 (1 + k_0) Z = -c_0 Z; \\ c_1 = -\frac{c_0}{1 + k_0}. \quad (118)$$

Для расчета параметра флиндерсбара по формуле (118) необходимо знать величины параметров c_0 и k_0 . Параметр c_0 можно рассчитать по коэффициенту B'_0 , определенному в двух различных точках земной поверхности. Расчет ясен из следующих выражений:

$$\text{в магнитной широте } (Z_1; H_1) \dots B'_1 \lambda H_1 = c_0 Z_1 + P_0$$

$$\text{в магнитной широте } (Z_2; H_2) \dots B'_2 \lambda H_2 = c_0 Z_2 + P_0$$

$$B'_2 \lambda H_2 - B'_1 \lambda H_1 = c_0 (Z_2 - Z_1).$$

Таким образом,

$$c_0 = \lambda \frac{B'_2 H_2 - B'_1 H_1}{Z_2 - Z_1}. \quad (119)$$

Для вычисления параметра k_0 необходимо в двух различных широтах измерить дефлектором судовую вертикальную силу Z' на курсе $E(W)$ магнитном:

$$\text{в магнитной широте } (Z_1; H_1) \dots Z'_{E, W} = Z_1 + k_0 Z_1 + R_0$$

$$\text{в магнитной широте } (Z_2; H_2) \dots Z''_{E, W} = Z_2 + k_0 Z_2 + R_0$$

$$Z'' - Z' = (1 + k_0)(Z_2 - Z_1).$$

Таким образом,

$$1 + k_0 = \frac{Z''_{E, W} - Z'_{E, W}}{Z_2 - Z_1}. \quad (120)$$

Расчет параметра c_1 и установка флиндерсбара, как видим, возможны только после того, как судно совершит значительное плавание из одной магнитной широты в другую и при этом будут произведены специальные наблюдения по определению судовых параметров c_0

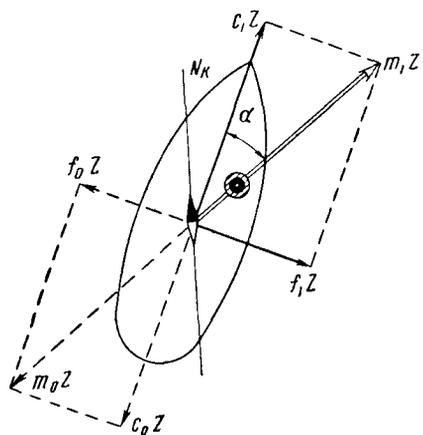


Рис 82

и k_0 . Для этого можно создать искусственный полигон, вертикальное магнитное поле которого регулируется при помощи большого индукционного кольца, расположенного горизонтально на дне бухты (бассейна). Одним из первых авторов подобного предложения был В. Я. Павлинов, сделавший расчет с указанием некоторых технических деталей.

Мы рассмотрели компенсацию судовой силы $c_0 Z$ при помощи флиндерсбара. Если помимо силы $c_0 Z$ наблюдается достаточная по величине сила $f_0 Z$, то компенсации подлежат обе эти силы. Для совместной компенсации сил $c_0 Z$ и $f_0 Z$ флиндерсбар устанавливают не в продольной плоскости, а под некоторым углом α (рис. 82).

Величина параметра флиндерсбара m_1 в этом случае определяется выражением

$$m_1 = \sqrt{c_1^2 + f_1^2} = \sqrt{c_0^2 + f_0^2},$$

если считать, что судовое вертикальное железо и флиндерсбар намагничиваются одной и той же силой Z .

Если учитывать, что судовое железо намагничивается силой Z , а флиндерсбар силой Z' , то параметром флиндерсбара будет

$$m = \frac{\sqrt{c_0^2 + f_0^2}}{1 + k_0}. \quad (121)$$

Значение судового параметра f_0 можно найти по формуле

$$f_0 = \lambda \frac{C'_2 H_2 - C'_1 H_1}{Z_2 - Z_1}.$$

где C'_2 и C'_1 — полукруговые коэффициенты, определенные в двух различных магнитных широтах.

Флиндерсбар, как и всякий другой близко помещенный к компасу брусок мягкого железа, создает девиацию от индукции. Если он установлен в продольной плоскости, то образует положительный коэффициент индукции ($+D_i$), если в поперечной, то отрицательный ($-D_i$), если в произвольной, то коэффициенты $+E_i$ или $-E_i$. Суммарный коэффициент индукции $S_i = \sqrt{D_i^2 + E_i^2}$ может достигать 1° и более (для средних широт).

После установки флиндерсбара необходимо производить уничтожение девиации от индукции при помощи индукционных пластин. Последнее обстоятельство вынуждает операцию по установке флиндерсбара производить в два приема — сначала в береговых условиях, а затем на судне. Это является значительным недостатком флиндерсбара обычного типа.

§ 40. БЕЗЫНДУКЦИОННЫЙ ФЛИНДЕРСБАР

Кафедрой судовождения ЛВИМУ предложена новая конструкция флиндерсбара — так называемый *сдвоенный флиндерсбар*. Его отличительные особенности — безындукционность, т. е. отсутствие девиации от индукции, и малый вес (1,5—2 кг вместо 10—15 кг).

Сдвоенный флиндерсбар представляет собой совокупность двух одинаковых вертикальных брусков, расположенных во взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях, проходящих через центр компаса (рис. 83). Каждый брусок в отдельности создает параметры m_1 и m_2 , равные между собой. Суммарный параметр от двух брусков будет

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2}.$$

Направление равнодействующей силы mZ' определяется углом α относительно диаметральной плоскости, причем $\operatorname{tg} \alpha = \frac{f_0}{c_0}$, где f_0 и c_0 — судовые параметры. Установочные углы α_1 и α_2 между диаметральной плоскостью и направлением на бруски, как видно из рис. 83, определяются выражениями:

$$\alpha_2 = \alpha + 45^\circ; \quad \alpha_1 = \alpha - 45^\circ.$$

Докажем, что такой флиндерсбар является безындукционным, т. е. не создает девиации от индукции.

Девиация δ_i , появляющаяся вследствие индукции стрелок компаса, имеет, как известно, четвертной характер. В случае сдвоенного флиндерсбара

$$\delta_i = S_{i_1} \sin 2(k' + \alpha_1) + S_{i_2} \sin 2(k' + \alpha_2),$$

где

S_{i_1} — коэффициент индукции от первого бруска;

k' — компасный курс;

S_{i_2} — коэффициент индукции от второго бруска;

α_1 и α_2 — углы, определяющие направление из центра картушки на бруски относительно диаметральной плоскости.

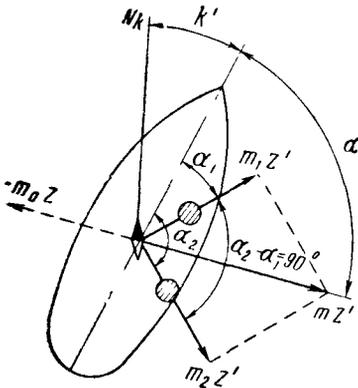


Рис. 83

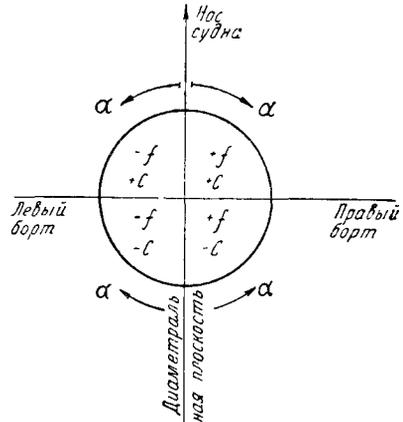


Рис. 84

Произведем несложные преобразования, учитывая, что $S_{i_1} = S_{i_2} = S_i$:

$$\begin{aligned} \delta_i &= S_i [\sin(2k' + 2\alpha_1) + \sin(2k' + 2\alpha_2)] = \\ &= S_i \cdot 2 \sin \frac{(2k' + 2\alpha_1) + (2k' + 2\alpha_2)}{2} \cos \frac{(2k' + 2\alpha_1) - (2k' + 2\alpha_2)}{2} = \\ &= 2S_i \sin(2k' + \alpha_1 + \alpha_2) \cos(\alpha_1 - \alpha_2). \end{aligned}$$

Получаем необходимое требование, отвечающее условию безындукционности $\delta_i = 0$:

$$\cos(\alpha_2 - \alpha_1) = 0$$

или

$$\alpha_2 - \alpha_1 = 90^\circ.$$

Эксперименты подтверждают этот вывод и показывают, что сдвоенный флиндерсбар является безындукционным.

Малый вес сдвоенного флиндерсбара достигается тем, что его стержни имеют рациональное отношение длины l к диаметру d . Это отно-

шение $\Lambda = \frac{l}{d}$ лежит в пределах 20—35. При таком рациональном значении Λ наблюдается максимальная «отдача» стержня, т. е. его параметр m принимает максимальное значение для заданного объема стержня. Для создания параметра $m = 0,1$, что соответствует полукруговой девиации 18° для магнитной широты Ленинграда ($\text{tg} I = 3,2$), достаточно иметь в качестве безындукционного флиндерсбара два вертикальных бруска с размерами:

$$l = 62 \text{ см}; \quad d = 1,8 \text{ см},$$

устанавливаемыми на расстоянии $r = 20,5 \text{ см}$ от центра компаса.

Установка безындукционного флиндерсбара производится непосредственно на судне без предварительного своза компаса на берег, так как уничтожения индукции не требуется.

Работа по установке безындукционного флиндерсбара выполняется в следующем порядке.

1. Рассчитывают параметр флиндерсбара по формуле

$$m = \frac{\sqrt{c_0^2 + f_0^2}}{1 + k_0},$$

где c_0 , f_0 и k_0 — известные судовые параметры.

2. По величине m , пользуясь графиком¹ зависимости m от длины l , следует подобрать необходимое значение длины брусков флиндерсбара.

3. Рассчитывают угол $\alpha = \text{arc tg } \frac{f_0}{c_0}$. Поворачивают установочное кольцо с брусками флиндерсбаров на угол α от диаметральной плоскости. Для правильной ориентировки флиндерсбара удобно пользоваться схемой, изображенной на рис. 84. Эта схема показывает, в какую сторону от диаметральной плоскости надо отсчитывать угол α .

4. Закрепляют бруски флиндерсбаров в кронштейнах так, чтобы верхние концы их были на уровне плоскости картушки.

5. После установки флиндерсбара производят уничтожение полукруговой девиации магнитами-уничтожителями.

§ 41. ИЗМЕНЕНИЕ ЧЕТВЕРТНОЙ ДЕВИАЦИИ

Коэффициенты четвертной девиации представляют собой сумму обычных и индукционных коэффициентов:

$$D'_s = D' + D'_i, \quad E'_s = E' + E'_i.$$

Коэффициенты D'_i и E'_i , появляющиеся в результате индукции стрелок картушки компаса на близлежащее железо, зависят от горизонтальной составляющей земного поля H . Изменение коэффициентов

¹ Графики для установки флиндерсбара составляются заводом-изготовителем. Они отражают зависимость $m = f(l)$,

индукции при переходе судна из одного района плавания в другой рассматривалось выше (§ 33).

Коэффициенты D' и E' (неиндукционного происхождения) не зависят непосредственно от элементов земного магнитного поля, так как являются функциями параметров Пуассона:

$$D' = \frac{a-e}{2\lambda} = \frac{a-e}{2+a+e}, \quad E' = \frac{d+b}{2\lambda} = \frac{d+b}{2+a+e}.$$

Следовательно, единственной причиной изменения коэффициентов D' и E' может быть только изменение параметров, входящих в выражения этих коэффициентов.

Параметры a и e имеют следующую зависимость:

$$a = \frac{\kappa}{1 + \kappa N_x} \cdot K_x; \quad e = \frac{\kappa}{1 + \kappa N_y} \cdot K_y,$$

где κ — магнитная восприимчивость материала;

N_x ; N_y — коэффициенты размагничивания по направлениям x и y ;

K_x ; K_y — постоянные коэффициенты, зависящие от размеров и расположения отдельных частей судна.

Коэффициенты K_x и K_y остаются неизменными, если в расположении судового железа не происходит никаких изменений. Коэффициенты размагничивания N_x и N_y при этом также остаются постоянными.

Величина магнитной восприимчивости κ является функцией магнитного поля: $\kappa = f(H)$. Графики, показанные на рис. 85, получаются опытным путем.

При плавании судна, если магнитное поле H изменяется, величина κ также будет изменяться. В результате этого параметры a и e , а следовательно, и коэффициент D' изменят свои величины. Аналогичные изменения претерпевает и коэффициент E .

Всегда ли изменение параметров влечет за собой изменение коэффициентов девиации? Чтобы лучше разобраться в этом вопросе, рассмотрим следующий пример.

Два горизонтальных бруска 1 и 2 (рис. 86) из мягкого ферромагнитного материала установлены около компаса так, что их влияние на компас взаимно компенсируется друг другом, т. е. результирующий коэффициент равен нулю:

$$\bar{D}' = D'_2 + (-D'_1) = 0.$$

Оба бруска находятся на значительном расстоянии от компаса, поэтому индукция отсутствует. Магнитная восприимчивость κ_1 первого бруска отличается от восприимчивости κ_2 второго бруска. Каждый брусек создает четвертные коэффициенты:

$$D'_1 = \frac{a_1}{2\lambda_1} = \frac{a_1}{2+a_1}; \quad D'_2 = \frac{a_2}{2\lambda_2} = \frac{a_2}{2+a_2}.$$

Результирующий коэффициент, если не учитывать взаимного влияния брусков, равен сумме коэффициентов:

$$D' = D'_1 + D'_2 = \frac{a_1}{2+a_1} + \frac{a_2}{2+a_1} = \frac{2(a_1 a_2 + a_1 + a_2)}{a_1 a_2 + 2(2+a_1+a_2)}. \quad (122)$$

Очевидно, результирующий коэффициент D будет равен нулю, когда

$$a_1 a_2 + a_1 + a_2 = 0$$

или, пренебрегая величиной 2-го порядка ($a_1 a_2$),

$$a_1 + a_2 = 0. \quad (123)$$

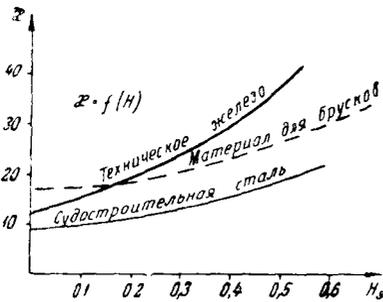


Рис 85

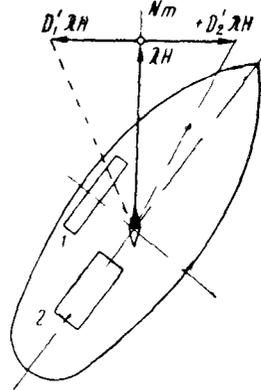


Рис 86

Подставляя значения параметров, получим:

$$\frac{\kappa_1}{1 + \kappa N_1} K_1 + \frac{\kappa_2}{1 + \kappa N_2} K_2 = 0. \quad (124)$$

Анализируя выражение (123), приходим к выводу, что при пропорциональном изменении параметров a_1 и a_2 условие отсутствия девиации нарушаться не будет. Действительно, если в результате изменения магнитного поля H параметры a_1 и a_2 изменят свою величину в одно и то же число раз, например в n раз, то, очевидно, условие (123) не изменится:

$$a_1 + a_2 = 0, \quad n a_1 + n a_2 = 0.$$

Значит, изменение коэффициентов девиации происходит не от любого изменения параметров, а только от *непропорционального* их изменения. Поэтому важно выяснить, в каких случаях происходит пропорциональное изменение параметров.

Из выражения (124) видно, что для этого необходимо иметь выполненными три условия:

- 1) $\kappa_1 = \kappa_2$;
- 2) $N_1 = N_2$;
- 3) $K_1 = K_2$.

Следует отметить, что третье условие ($K_1 = K_2$) всегда выполнимо, если два или несколько различных по форме и объему брусков установить на соответственно разных расстояниях.

Второе условие ($N_1 = N_2$) обозначает, что форма у двух (или нескольких) рассматриваемых брусков должна быть такой, чтобы коэффициенты размагничивания по продольной оси были равными. В частном случае два бруска должны обладать геометрическим подобием.

Первое условие ($\kappa_1 = \kappa_2$) означает, что бруски должны быть изготовлены из одного и того же материала.

Как показывает расчет, особое значение имеет первое условие. Уже одного этого условия будет достаточно, чтобы коэффициенты практически оставались постоянными, а при полной компенсации ($K_1 = K_2$) оставались равными нулю.

Этот вывод имеет большое практическое значение для обеспечения постоянных и надежных показаний компаса при значительной перемене магнитной широты.

В указанном примере действие второго бруска можно рассматривать как совокупное влияние всех продольных частей судна; тогда первый из брусков можно считать компенсационным. Такие компенсационные бруски устанавливаются для уничтожения четвертной девиации. Из примера становится очевидно, что компенсационные бруски (или шары), применяемые для уничтожения четвертной девиации, должны изготавливаться из того же материала, что и соответствующие части судна, т. е. из судостроительной стали. Для компенсационных брусков можно также выбирать такой ферромагнитный материал, у которого график $\kappa = f(H)$ идет параллельно аналогичному графику судостроительной стали (см. рис. 85).

Сделаем расчет, показывающий, насколько изменится коэффициент четвертной девиации D' только от того, что материал компенсационного бруска выбран неправильно.

Пусть компенсационный брусок (на рис. 86 брусок 1) изготовлен из мягкого в магнитном отношении железа (например, «армко»), а материал второго бруска, создающего девиацию, — судостроительная сталь.

Причиной нарушения компенсации девиации будет непропорциональное изменение магнитной восприимчивости, показанное на рис. 85.

Возьмем бруски, имеющие коэффициенты размагничивания соответственно $N_1 = 0,12$ и $N_2 = 0,30$. Установим их на таком расстоянии, чтобы они создавали при $H = 0,05$ э (высокие широты), равные по величине, но обратные по знаку приближенные четвертные коэффициенты:

$$D_1 = -5^\circ \text{ и } D_2 = +5^\circ.$$

Точные коэффициенты соответственно будут:

$$D'_1 = -0,087; \quad D'_2 = +0,087.$$

Вычислим параметры:

$$a_1 = \frac{2D'_1}{1-D'_1} = \frac{2(-0,087)}{1-(-0,087)} = -0,160; \quad a_2 = +0,190.$$

Здесь учтены величины 2-го порядка. Проверим условие отсутствия девиации:

$$a_1 a_2 + a_1 + a_2 = 0; \\ -0,16 \cdot 0,19 - 0,16 + 0,19 = -0,03 - 0,16 + 0,19 = 0.$$

Рассчитаем значения действующих магнитных восприимчивостей для $H = 0,05$ э:

$$\kappa_1 = 12; \quad \kappa'_1 = \frac{\kappa_1}{1 + \kappa_1 L_1} = \frac{12}{1 + 12 \cdot 0,12} = 5,0; \\ \kappa_2 = 10; \quad \kappa'_2 = \frac{\kappa_2}{1 + \kappa_2 L_2} = \frac{10}{1 + 10 \cdot 0,3} = 2,5.$$

Вычислим значения постоянных множителей K_1 и K_2 :

$$K_1 = \frac{a_1}{\kappa'_1} = -\frac{0,16}{5,0} = -0,032; \quad K_2 = \frac{a_2}{\kappa'_2} = \frac{0,19}{2,5} = +0,076.$$

Найдем новые параметры a_{1H} и a_{2H} и новый коэффициент D для $H = 0,55$ э (район экватора):

$$\kappa_{1H} = 38; \quad \kappa'_{1H} = \frac{38}{1 + 38 \cdot 0,12} = 6,8; \quad a_{1H} = \kappa'_{1H} \cdot K_1 = -0,218; \\ \kappa_{2H} = 16; \quad \kappa'_{2H} = \frac{16}{1 + 16 \cdot 0,3} = 2,8; \quad a_{2H} = \kappa'_{2H} \cdot K_2 = +0,213.$$

Результирующий коэффициент D'_H подсчитаем по формуле (122):

$$D'_H = \frac{2(a_1 a_2 + a_1 + a_2)}{a_1 a_2 + 2(2 + a_1 + a_2)} = \frac{2(-0,046 - 0,0055)}{-0,046 + 2(2 - 0,0055)} = -0,026.$$

Соответствующий приближенный коэффициент

$$D_H = -1^\circ,5.$$

Как видим, при переходе судна из высоких широт в район экватора по причине непропорционального изменения параметров компенсация четвертной девиации нарушается и появляется довольно значительный коэффициент $D = -1^\circ,5$.

Аналогичные расчеты, подтвержденные опытом, показывают, что полукруговые коэффициенты по той же причине подвержены значительно большим изменениям. В результате неправильного выбора материала для флиндерсбаров при соблюдении всех других условий их установки полукруговые коэффициенты могут изменяться до $8-9^\circ$.

Правильный выбор материала для изготовления всех видов компенсационных брусков и придание этим брускам соответствующей формы способствуют абсолютному уничтожению девиации для всех районов плавания. Без выполнения этих требований показания магнитного компаса в той или иной степени будут изменяться во время плавания в различных широтах.

Глава IX

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ДЕВИЦИЯ

§ 42. ВЛИЯНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ПРОВОДНИКА И КРУГОВОГО КОНТУРА С ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ НА МАГНИТНЫЙ КОМПАС

Постоянный ток, текущий по прямолинейному проводнику или контуру, создает в окружающем пространстве магнитное поле. Это магнитное поле воздействует на магнитную систему компаса и вызывает девиацию.

Девиация, появляющаяся от воздействия на магнитный компас различных проводников с постоянным электрическим током, называется *электромагнитной девиацией*.

Прежде чем приступить к изучению электромагнитной девиации и способам ее уничтожения, необходимо рассмотреть влияние прямолинейного проводника и кругового контура с постоянным током на магнитный компас.

Пусть по прямолинейному проводнику (рис. 87) проходит постоянный ток, величина которого I . Этот ток в окружающем проводник пространстве создает магнитное поле, напряженность которого в любой точке A может быть рассчитана по закону Био — Савара — Лапласа.

В дифференциальной форме этот закон имеет следующий вид:

$$dH = \frac{Idl}{4\pi\rho^2} \sin \varphi. \quad (125)$$

где dH — напряженность магнитного поля в точке A , a/m ;

I — сила тока, a ;

dl — элемент проводника, m ;

ρ — расстояние от элемента проводника до выбранной точки A , m ;

φ — угол между направлением тока и направлением ρ , rad .

Интегрированием выражения (125) можно получить формулу для расчета напряженности магнитного поля H прямолинейного участка проводника BC для любой точки A :

$$H = \int_{\varphi}^{\varphi_1} dH = \int_{\varphi}^{\varphi_1} \frac{I dl}{4\pi\rho^2} \sin \varphi.$$

Из прямоугольного треугольника ABD имеем:

$$\rho^2 = \frac{r^2}{\sin^2 \varphi}; \quad l = r \operatorname{ctg} \varphi; \quad dl = -\frac{r}{\sin^2 \varphi} d\varphi.$$

Подставив значения ρ^2 и dl , получим:

$$H = -\int_{\varphi}^{\varphi_1} \frac{I \sin \varphi}{4\pi r} d\varphi = \frac{I}{4\pi r} [\cos \varphi]_{\varphi}^{\varphi_1},$$

т. е.

$$H = \frac{I}{4\pi r} (\cos \varphi - \cos \varphi_1). \quad (126)$$

В случае бесконечно длинного прямолинейного проводника пределами интегрирования являются значения:

$$\varphi = 0^\circ; \quad \varphi_1 = 180^\circ$$

и напряженность поля рассчитывается по простейшей формуле

$$H = \frac{1}{4\pi} \frac{2I}{r} a/m, \quad (127)$$

где I — сила тока, a ;

r — кратчайшее расстояние от проводника до рассматриваемой точки, m .

Для выражения напряженности H в эрстедах надо пользоваться следующей зависимостью:

$$1 \text{ а/м} = 0,0126 \text{ э},$$

а для обратного перехода

$$1 \text{ э} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ а/м} \simeq 79,58 \text{ а/м}.$$

Эти формулы позволяют определить влияние проводника с постоянным током на магнитную стрелку компаса.

Рассмотрим следующий пример. В рулевой рубке (рис. 88) установлен магнитный компас. Электропроводка освещения выполнена так, что вблизи от компаса проходит один провод. Напряжение судовой сети $U = 110 \text{ в}$, мощность лампочки освещения рубки $P = 110 \text{ вт}$. Воспользуемся формулой (127) и определим влияние провода с постоянным током на магнитный компас.

При включении в сеть электролампочки по проводу проходит ток $I = \frac{P}{U} = 1$ а. Пусть $\varphi = 30^\circ$; $\varphi_1 = 150^\circ$; $r = 0,6$ м. Определяем напряженность h поля в точке O (центр магнитной системы компаса):

$$h = \frac{I}{4\pi r} (\cos \varphi - \cos \varphi_1) = \frac{1}{12,57 \cdot 0,6} \cdot 1,732 = 0,23 \text{ а/м}$$

или

$$h = 0,23 \cdot 0,0126 \cong 0,003 \text{ э.}$$

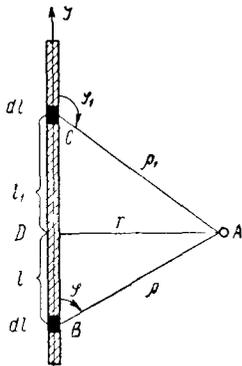


Рис. 87

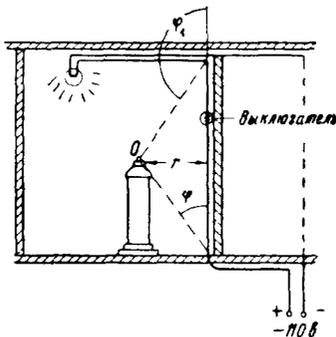


Рис. 88

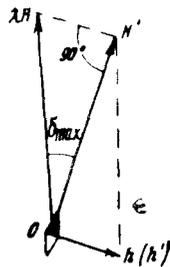


Рис. 89

Под действием магнитного поля $h = 0,003$ э стрелка компаса отклонится от первоначального положения, определяемого направляющей силой λH , на некоторый угол δ .

Рассчитаем максимальное значение электромагнитной девиации для случая, когда $\lambda H = 0,10$ э. На рис. 89 показано расположение сил, которые образуют прямоугольный треугольник.

Очевидно, что

$$\sin \delta_{\max} = \frac{h}{\lambda H} = \frac{0,003}{0,1} = 0,03; \quad \delta_{\max} \cong 1^\circ,7.$$

Как видим, сравнительно небольшой участок провода с электрическим током в 1 а создает ощутимое отклонение компасной стрелки.

Чтобы избежать влияния проводов с током на магнитный компас, применяют двоянную (бифилярную) укладку проводов. Поскольку постоянные токи в проводах бифилярной проводки имеют обратные направления, суммарное магнитное поле от обоих проводов в достаточно удаленных точках можно считать равным нулю. На рис. 90 показано расположение магнитных сил от бифилярной проводки. В точке A напряженность магнитного поля H складывается из двух составляющих: h_1 и h_2 , причем

$$h_1 = h_2 = \frac{I}{2\pi r}; \quad H = 2h_1 \sin \alpha.$$

Обозначив расстояние между проводами через r_0 , а расстояние от точки A до плоскости, в которой лежат провода, через r , получим:

$$\sin \alpha = \frac{1}{2} \frac{r_0}{\rho}; \quad \rho^2 = r^2 + \frac{r_0^2}{4}; \quad H = \frac{I \cdot r_0}{2\pi\rho^2} = \frac{I}{2\pi \left(r^2 + \frac{r_0^2}{4} \right)}.$$

При малом расстоянии r_0 величиной $\frac{r_0^2}{4}$ можно пренебречь, тогда формула для расчета напряженности бифилярной проводки будет иметь вид:

$$H = \frac{I r_0}{2\pi r^2} \text{ а/м.} \quad (128)$$

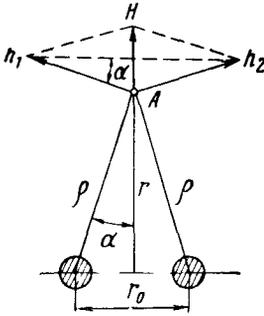


Рис. 90

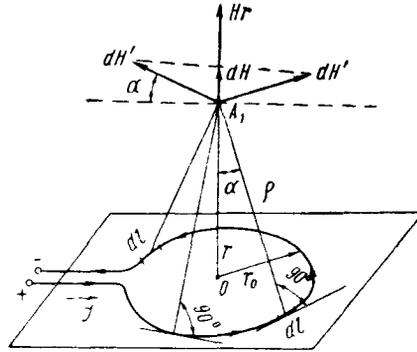


Рис. 91

При $r_0 \rightarrow 0$ величина H также стремится к нулю. Когда провода уложены вплотную друг к другу, бифилярная обмотка практически не оказывает влияния на компас.

Теперь рассмотрим влияние на магнитный компас кругового контура с постоянным током.

Найдем напряженность магнитного поля в точке A_1 , лежащей на перпендикуляре к плоскости контура, проведенном из его центра (рис. 91). Каждый элементарный участок проводника dl в точке A_1 образует вектор напряженности dH' . Применяя закон Био — Савара — Лапласа, можно найти:

$$dH' = \frac{I dl}{4\pi\rho^2} \sin 90^\circ = \frac{I dl}{4\pi\rho^2}.$$

Проекции элементарных векторов dH' на направление OA_1 равны

$$dH = dH' \sin \alpha = dH' \frac{r_0}{\rho} = \frac{I \cdot dl \cdot r_0}{4\pi\rho^3}, \quad (129)$$

где α — угол между направлениями r и ρ ;

r_0 — радиус кругового контура;

ρ — расстояние между элементом контура dl и точкой A_1 .

Проинтегрировав выражение (129) по всей длине контура, получим

$$H_r = \int_0^l \frac{I r_0}{4\pi \rho^3} dl = \frac{I \cdot r_0 \cdot l}{4\pi \rho^3}, \text{ так как } l = 2\pi r_0;$$

поэтому

$$H_r = \frac{I r_0^2}{2\rho^3}. \quad (130)$$

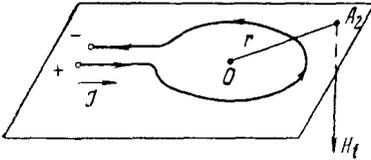


Рис 92

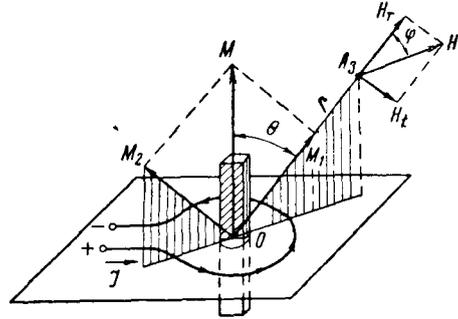


Рис 93

Последнее выражение можно видоизменить, учитывая, что $\pi r_0^2 = s$ (площадь контура), а $\rho = \sqrt{r^2 + r_0^2}$:

$$H_r = \frac{I s}{2\pi (r^2 + r_0^2)^{3/2}} = \frac{I s}{2\pi r^3} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right)^{3/2}}.$$

Раскладывая выражение $\frac{1}{1 + \left(\frac{r_0^2}{r^2}\right)^{3/2}}$ в ряд и ограничиваясь дву-

мя членами разложения, получим окончательное выражение:

$$H_r = \frac{I s}{2\pi r^3} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{r_0^2}{r^2}\right) a/m. \quad (131)$$

Для случая, когда точка A_2 расположена в плоскости контура (рис. 92), напряженность

$$H_t = \frac{I s}{4\pi r^3} \left(1 + \frac{2r_0^2}{r^2}\right). \quad (132)$$

Для приближенных расчетов, особенно когда рассматриваемая точка A_1 или A_2 значительно удалена от центра контура, можно пользоваться формулами:

$$H_r = \frac{I s}{2\pi r^3} a/m, \quad (133)$$

$$H_t = \frac{I s}{4\pi r^3} a/m. \quad (134)$$

Сравнивая формулы (131), (132), (133), (134) с известными выражениями напряженности магнита, можно убедиться, что контур с током эквивалентен прямолинейному магниту, ось которого совпадает с осью контура. Произведение Is , очевидно, есть не что иное, как магнитный момент M контура ($M = Is$).

Для частного случая, когда рассматриваемая точка A находится в центре кругового контура, т. е. когда $r = 0$, будем иметь:

$$H = \frac{Is}{2\pi (r_0^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{\pi r_0^2 I}{2\pi r_0^3};$$

$$H = \frac{I}{2r_0} \text{ а/м.} \quad (135)$$

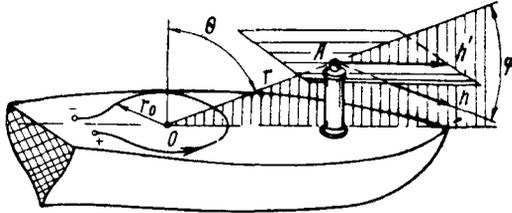


Рис 94

Для точки A_3 , взятой произвольно (рис. 93), напряженность контура рассчитывается так же, как и для магнита, путем разложения вектора магнитного момента M на две составляющие:

$$M_1 = M \cos \theta; \quad M_2 = M \sin \theta,$$

где θ — угол между направлениями \vec{M} и \vec{r} .

В точке A_3 полный вектор напряженности \vec{H} можно представить в виде геометрической суммы радиального вектора \vec{H}_r и тангенциального вектора \vec{H}_t . Значения \vec{H}_r и \vec{H}_t рассчитывают по формулам:

$$H_r = \frac{M_1}{2\pi r^3} = \frac{M}{2\pi r^3} \cos \theta = \frac{Is}{2\pi r^3} \cos \theta;$$

$$H_t = \frac{M_2}{4\pi r^3} = \frac{Is}{4\pi r^3} \sin \theta.$$

Величину полного вектора H можно рассчитать по формуле

$$H = \sqrt{H_r^2 + H_t^2} = \frac{Is}{4\pi r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}. \quad (136)$$

Направление вектора H определяется углом φ , причем

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \theta. \quad (137)$$

Если контур состоит не из одного витка, а из n витков, то величина H , рассчитанная по формуле (136), должна быть умножена на n .

Рассмотрим пример, поясняющий действие кругового контура с постоянным током на магнитный компас.

Пример. Представим, что на судне в плоскости палубы имеется круговая обмотка из 20 витков (рис. 94). Радиус обмотки $r_0 = 4$ м. На расстоянии $r = 10$ м в точке A находится магнитная стрелка компаса. Угол $\theta = 60^\circ$. Требуется рассчитать величину максимального отклонения δ_{\max} компасной стрелки под действием обмотки, если по обмотке протекает ток $I = 10$ а, а величина направляющей силы $\lambda H = 0,2$ э.

Прежде всего необходимо определить величину и направление вектора h , характеризующие напряженность контура в точке A . Для расчета воспользуемся формулами (136) и (137).

$$h = \frac{I\pi r_0^2 \cdot n}{4\pi r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta} = \frac{10 \cdot 4^2 \cdot 20}{4 \cdot 10^3} \cdot 1,323 = 1,06 \text{ а/м}$$

или

$$h = 1,06 \cdot 0,0126 = 0,0134 \text{ э};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \theta = \frac{1}{2} \cdot 1,732 = 0,866;$$

$$\varphi = 41^\circ.$$

Так как компасная стрелка отклоняется только под действием горизонтальных сил, для вычисления электромагнитной девиации от влияния обмотки с током необходимо найти горизонтальную составляющую h' вектора h . Из рис. 94 ясно, что

$$h' = h \cos(\theta + \varphi - 90^\circ) = h \cos 11^\circ = 0,0134 \cdot 0,982 \approx 0,013 \text{ э.}$$

Величина максимального отклонения стрелки δ_{\max} , наблюдаемого на компасных курсах, когда суммарное магнитное поле H' и отклоняющее поле h' взаимно перпендикулярны, находится из прямоугольного треугольника (см. рис. 89):

$$\sin \delta_{\max} = \frac{h'}{\lambda H} = \frac{0,013}{0,2} = 0,065,$$

$$\delta_{\max} \approx 3^\circ,7.$$

Как видим, отклонение компасной стрелки под действием проводников и особенно контуров с постоянным электрическим током, т. е. электромагнитная девиация, может достигать значительной величины.

§ 43. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СУДНА ПОД ЕГО ДНИЩЕМ. ОБМОТКИ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ

При изучении девиации магнитного компаса в первую очередь нас интересовало магнитное поле судна в той точке, где находится центр магнитной системы компаса. При изучении электромагнитной девиации необходимо также рассмотреть магнитное поле в других точках, расположенных под днищем судна. Этот вопрос связан с установкой на судах специальных обмоток для защиты судов от магнитных мин. Магнитное поле судна, распространяясь на значительную глубину, действует на чувствительный элемент взрывателя магнитной мины. Чтобы предохранить судно от подрыва на магнитных минах, необходимо добиться компенсации магнитного поля судна для точек, ле-

жащих под его днищем на определенной глубине. Эту компенсацию производят при помощи специальных обмоток размагничивания, укладываемых вокруг корпуса судна или его отдельных частей. По обмоткам пропускают постоянный электрический ток определенной величины.

Каждая обмотка размагничивающего устройства, являющаяся контуром с постоянным током, создает электромагнитную девиацию. Магнитное поле судна в некоторой точке O_1 (рис. 95) под днищем судна может быть выражено тремя уравнениями Пуассона:

$$\left. \begin{aligned} X'' &= X + a' X + b' Y + c' Z + P' \\ Y'' &= Y + d' X + e' Y + f' Z + Q' \\ Z'' &= Z + g' X + h' Y + k' Z + R' \end{aligned} \right\}. \quad (138)$$

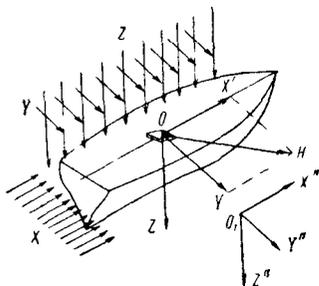


Рис. 95

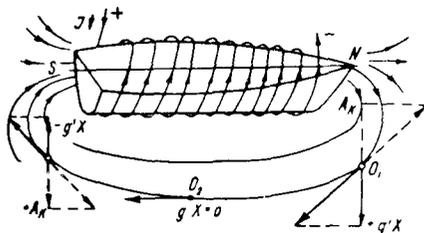


Рис. 96

В этих уравнениях:

X'' , Y'' и Z'' — суммарные продольная, поперечная и вертикальная силы в точке O_1 , образованные совместным действием магнитного поля Земли и судна;

$a'X, b'Y, \dots, k'Z$ — силы, входящие в уравнения Пуассона, образованные мягким судовым железом в точке O_1 ;

P', Q', R' — силы, образованные твердым судовым железом в точке O_1 .

Из трех сил X'' , Y'' и Z'' в средних широтах наибольшую величину имеет вертикальная сила Z'' . На этом основании взрыватели магнитных мин обычно построены на принципе действия вертикальной составляющей магнитного поля судна.

Напишем уравнение сил, действующих в точке O_1 под днищем судна и подлежащих компенсации обмотками размагничивания:

$$Z'' = g' X + h' Y + k' Z + L_z + M_z + N_z. \quad (139)$$

Здесь сила R' заменена тремя составляющими:

L_z — вертикальной силой от влияния продольного судового твердого железа;

M_z — вертикальной силой от влияния поперечного судового твердого железа;

N_z — вертикальной силой от влияния вертикального судового твердого железа.

Выражение (139) иногда записывают иначе, обозначая первые три силы, образованные мягким судовым железом, через A_z, B_z, C_z :

$$Z'' = A_z + B_z + C_z + L_z + M_z + N_z. \quad (140)$$

На примере вертикальной составляющей Z'' рассмотрим принцип компенсации магнитного поля судна при помощи обмоток размаг-

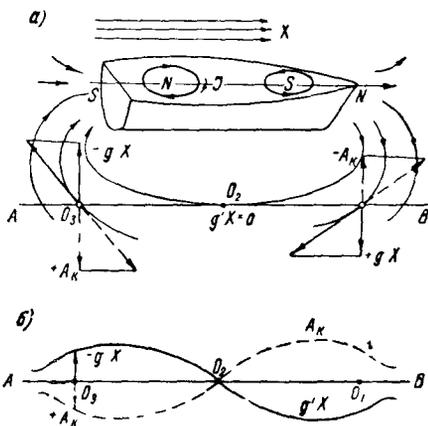


Рис 97

ничивания. Каждая сила, входящая в выражение (139), компенсируется отдельной обмоткой.

Компенсация силы $g'X$. Сила $g'X$ происходит от влияния продольного мягкого железа судна, намагниченного продольной составляющей X земного магнитного поля.

Сила $g'X$ зависит от магнитного курса судна и магнитной широты, так как

$$X = H \cos k.$$

Компенсация силы $g'X$ может быть выполнена двумя способами с помощью:

шпангоутной обмотки (рис. 96), что производится редко; кормовой и носовой палубных (горизонтальных) обмоток (рис. 97, а).

Оба эти способа дают одинаковый результат, но конструктивно выполнение кормовой и носовой обмоток проще, чем шпангоутной, поэтому второй способ имеет преимущественное применение.

Ток в носовой и кормовой обмотках имеет противоположные на-

правления. Его величину регулируют пропорционально косинусу магнитного курса:

$$I = I_0 \cos k,$$

где I_0 — максимальная величина тока (на курсах N и S).

На рис. 97, б приведены две кривые, показывающие распределение вертикальной составляющей $g'X$ и компенсирующей силы A_k в различных точках ($O_1, O_2, O_3, \dots, O_n$) на некоторой глубине под килем (слой AB) для курсов N половины горизонта. Сплошной кривой показан график сил $g'X$, образованных влиянием корпуса судна, пунктирной кривой — график компенсирующих сил A_k .

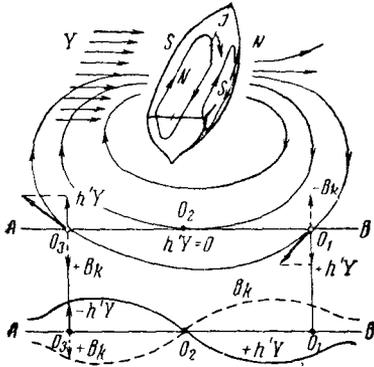


Рис. 98

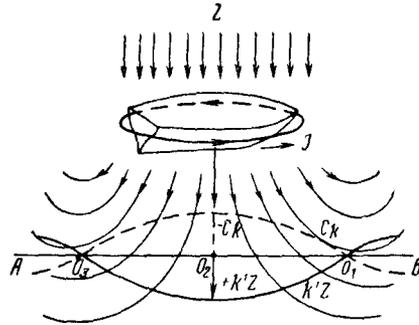


Рис. 99

Величина тока в указанных обмотках размагничивания подбирается так, чтобы суммарное вертикальное поле $g'X + A_k$ в любой точке защитного слоя равнялось нулю.

Компенсац и я с и л ы $h'Y$. С и л а $h'Y$ п р о и с х о д и т о т в л и я н и я п о п е р е ч н о г о м я г к о г о с у д о в о г о ж е л е з а, н а м а г н и ч е н н о г о п о п е р е ч н о й с о с т а в л я ю щ е й Y з е м н о г о м а г н и т н о г о п о л я.

Она зависит от магнитного курса судна и величины горизонтальной составляющей земного поля H , так как

$$Y = -H \sin k.$$

Компенсация силы $h'Y$ производится при помощи двух (левой и правой) батоксных обмоток (рис. 98). Величину тока I в батоксных обмотках изменяют пропорционально синусу курса:

$$I = I_0 \sin k.$$

Максимальное значение тока I_0 соответствует курсам судна E и W. Величина тока подбирается так, чтобы в каждой точке (O_1, O_2, \dots) защитного слоя AB под килем суммарное вертикальное поле $h'Y + A_k$ от влияния корпуса судна $h'Y$ и батоксных обмоток A_k равнялось нулю. На рис. 98 приведены для курсов W половины горизонта

две кривые распределения вертикальной составляющей $h'Y$ (сплошная кривая) и компенсирующей силы B_h (пунктирная кривая).

Компенсация силы $k'Z$. Сила $k'Z$ происходит от влияния вертикального мягкого судового железа, намагниченного вертикальной составляющей Z земного магнитного поля. Сила $k'Z$ не зависит от курса. Она зависит только от вертикальной составляющей земного магнитного поля Z . Компенсация силы $k'Z$ производится при помощи *основной обмотки* (рис. 99), плоскость которой параллельна грузовой ватерлинии судна.

Ток в основной обмотке при изменении курса оставляют неизменным. Величина тока I подбирается так, чтобы в каждой точке ($O_1, O_2, O_3 \dots$) защитного слоя суммарное вертикальное поле $k'Z + C_h$ от корпуса судна и основной обмотки равнялось нулю. С изменением вертикальной составляющей Z земного магнитного поля соответственно изменяют величину тока I в основной обмотке. На рис. 99 приведены графики распределения силы $k'Z$ (сплошная кривая) и силы C_h (пунктирная кривая) в различных точках защитного слоя.

Компенсация силы L_z . Сила L_z происходит от влияния продольного твердого судового железа. Ее величина не зависит ни от курса, ни от магнитной широты.

Компенсируется она при помощи тех же самых носовой и кормовой палубных обмоток, которые применяются для компенсации силы $g'X$ (см. рис. 97). Для этой цели носовая и кормовая палубные обмотки выполняют с двумя секциями: постоянной и курсовой. Курсовая секция палубных обмоток предназначена для компенсации силы $g'X$. В этой секции величину тока изменяют в зависимости от курса судна (пропорционально косинусу курса). Постоянная секция палубных обмоток питается током неизменной величины, не зависящей от курса судна. Величину тока в постоянной секции носовой и кормовой палубных обмоток подбирают так, чтобы обеспечить компенсацию силы L_z во всех точках защитного слоя. При изменении горизонтальной составляющей земного поля величину тока оставляют неизменной. График распределения силы L_z в различных точках ($O_1, O_2, O_3 \dots$) по линии AB защитного слоя аналогичен графику силы $g'X$, показанному на рис. 97, б.

Компенсация силы M_z . Сила M_z происходит от влияния поперечного твердого судового железа. Ее величина не зависит ни от курса, ни от магнитной широты.

Компенсация силы M_z производится при помощи постоянной секции батоксных обмоток (см. рис. 98). Величину тока в этой секции, оставляемую неизменной при перемене курса и магнитной широты, подбирают так, чтобы обеспечить компенсацию силы M_z во всех точках защитного слоя под килем. График распределения силы M_z в различных точках по линии AB защитного слоя аналогичен графику силы $h'Y$, показанному на рис. 98.

Компенсация силы N_z . Сила N_z происходит от влияния вертикального твердого судового железа. Ее величина не зависит ни от курса, ни от магнитной широты.

Силу N_z компенсируют совместно с силой $k'Z$ при помощи основной обмотки. Поскольку сила $k'Z$ зависит от вертикальной составляющей Z земного магнитного поля, а сила N_z не зависит от нее, то основную обмотку выполняют в виде двух секций: широтной (для силы $k'Z$) и постоянной (для силы N_z). Величину тока в постоянной секции основной обмотки подбирают так, чтобы обеспечить компенсацию силы N_z во всех точках защитного слоя под килем. Графики распределения сил N_z и $k'Z$ тождественны (см. рис. 98).

Таблица 21

Наименование обмоток	Секции обмоток	Силы, компенсируемые обмотками	Ток в обмотках
Основная	Постоянная Широтная	N_z $k'Z$	Неизменный Пропорционален Z
Носовая и кормовая палубные	Постоянная Курсовая, косинусная	L_z $g'X$	Неизменный Пропорционален $\cos k$
Батоксные	Постоянная Курсовая, синусная	M_z $h'Y$	Неизменный Пропорционален $\sin k$

Таким образом, для компенсации магнитного поля под днищем судна в целях защиты от магнитных мин применяются три вида обмоток (табл. 21): 1) основная, 2) носовая и кормовая палубные и 3) батоксные.

На некоторых судах устанавливают не все рассмотренные обмотки, а только основную — для компенсации наибольших сил N_z и $k'Z$.

Если на судне вообще отсутствуют обмотки размагничивания, на специальных станциях корпус судна периодически подвергают размагничиванию безобмоточным способом, который заключается в следующем. Вокруг корпуса судна подвешивают параллельно ватерлинии изолированный кабель, по которому периодически пропускают постоянный ток. При включении тока кабель поднимают так, чтобы он скользил вдоль борта, оставаясь параллельным плоскости ватерлинии, при выключении тока кабель опускают на первоначальное место. Затем повторяют подъем и опускание. Направление тока в кабеле выбирают такое, чтобы создавался эффект размагничивания корпуса судна. При безобмоточном размагничивании ослабляют влияние твердого в магнитном отношении судового железа, т. е. уменьшают величину сил L_z , M_z и N_z .

§ 44. ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДЕВИАЦИИ

При включении размагничивающих обмоток изменяется магнитное поле судна не только под днищем, но и в любом другом окружающем судно пространстве, в том числе и в той точке, где располагается магнитный компас. Обмотки размагничивания являются основным источником электромагнитной девиации.

При компенсации сил N_z , $k'Z$, L_z и M_z , т. е. при включении *постоянных* и *широтных* секций обмоток, ток в которых остается неизменным при изменении курса судна, в центре магнитной системы компаса возникают три постоянные силы P_3 , Q_3 и R_3 , подобные уже известным силам P , Q и R , происходящим от влияния твердого судового железа. В результате произойдет изменение коэффициентов полукруговой и креновой девиаций. Если до включения обмоток выражения полукруговых коэффициентов имеют вид:

$$B' = \frac{cZ + P}{\lambda H}; \quad C' = \frac{fZ + Q}{\lambda H},$$

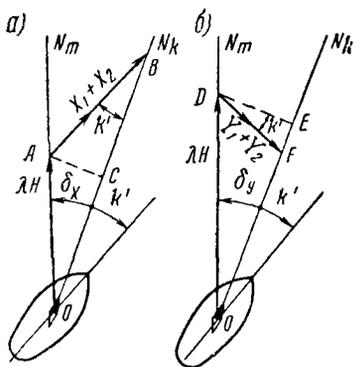


Рис. 100

то после включения с появлением сил P_3 и Q_3 они примут следующую зависимость:

$$B_c = \frac{cZ + P + P_3}{\lambda H}; \quad C_c = \frac{fZ + Q + Q_3}{\lambda H}.$$

Эти суммарные коэффициенты B_c , C_c можно представить в виде суммы:

$$B_c = B' + B_3; \quad C_c = C' + C_3,$$

где

$$B_3 = \frac{P_3}{\lambda H} \quad \text{и} \quad C_3 = \frac{Q_3}{\lambda H}$$

представляют собой коэффициенты полукруговой электромагнитной девиации. Рассмотрим влияние курсовых обмоток. При включении палубных обмоток, ток в которых изменяют пропорционально $\cos k$ (компенсация силы $g'X$), в центре компаса образуются продольная и поперечная силы X_1 и Y_1 . Эти силы, так же как и ток в палубных обмотках, меняют свою величину пропорционально косинусу курса:

$$\text{продольная сила } X_1 = X_1^0 \cos k,$$

$$\text{поперечная сила } Y_1 = Y_1^0 \sin k.$$

Здесь через X_1^0 и Y_1^0 обозначены максимальные (амплитудные) величины сил X_1 и Y_1 , соответствующие курсу судна $k = 0^\circ$ (180°).

При включении батоксных обмоток, ток в которых изменяют пропорционально $\sin k$ (компенсация силы $h'Y$), в центре компаса также образуются продольная и поперечная силы.

Обозначим их через X_2 и Y_2 , причем продольная сила $X_2 = X_2^0 \sin k$ и поперечная сила $Y_2 = Y_2^0 \cos k$.

X_2^0 и Y_2^0 — максимальные значения силы X_2 и Y_2 , соответствующие курсу судна $k = 90^\circ$ (270°).

Силы X_1 , X_2 , Y_1 и Y_2 , действуя на компасную стрелку, образуют электромагнитную девиацию δ_3 , равную

$$\delta_3 = \delta_x + \delta_y,$$

где δ_x — девиация, создаваемая продольными силами $X_1 + X_2$;

δ_y — девиация, создаваемая поперечными силами $Y_1 + Y_2$.

С помощью рис. 100, на котором показано действие этих сил, трудно получить следующие выражения:

из треугольников ABC и AOC (рис. 100, а)

$$\sin \delta_x = \frac{(X_1 + X_2) \sin k}{\lambda H}; \quad (141)$$

из треугольников DFE и DOE (рис. 100, б)

$$\sin \delta_y = \frac{(Y_1 + Y_2) \cos k'}{\lambda H}.$$

При сравнительно небольших величинах δ_x и δ_y можно принимать:

$$\sin \delta_x = \delta_x; \quad \sin \delta_y = \delta_y; \quad k = k'.$$

С учетом этого после подстановки значений X_1 , X_2 , Y_1 и Y_2 получим:

$$\delta_x = \frac{(X_1^0 \cos k' + X_2^0 \sin k') \sin k'}{\lambda H} = \frac{X_1^0}{2\lambda H} \sin 2k' - \frac{X_2^0}{2\lambda H} \cos 2k' + \frac{X_2^0}{2\lambda H};$$

$$\delta_y = \frac{(Y_1^0 \cos k' + Y_2^0 \sin k') \cos k'}{\lambda H} = \frac{Y_1^0}{2\lambda H} \cos 2k' + \frac{Y_1^0}{2\lambda H} + \frac{Y_2^0}{2\lambda H} \sin 2k'.$$

Суммарная электромагнитная девиация от совместного действия курсовых секций палубных и батоксных обмоток будет равна сумме этих выражений:

$$\delta_a = \delta_x + \delta_y = \frac{X_1^0 + Y_2^0}{2\lambda H} \sin 2k' + \frac{\bar{Y}_1^0 - X_2^0}{2\lambda H} \cos 2k' + \frac{X_2^0 + Y_1^0}{A_a}.$$

Тогда

$$\delta_a = A_a + D_a \sin 2k' + E_a \cos 2k'.$$

Можно сделать вывод, что при включении курсовых секций палубных и батоксных обмоток создаются силы $X_a = X_1 + X_2$ и $Y_a = Y_1 + Y_2$ и появляются постоянная и четвертная электромагнитные девиации, характеризующиеся коэффициентами:

$$\left. \begin{aligned} A_a &= \frac{X_2^0 + Y_1^0}{2\lambda H} \\ D_a &= \frac{X_1^0 - Y_2^0}{2\lambda H} \\ E_a &= \frac{Y_1^0 - X_2^0}{2\lambda H} \end{aligned} \right\} \text{— коэффициенты четвертной электромагнитной девиации.}$$

Следует отметить, что, помимо продольной и поперечной сил X_3 и Y_3 , курсовые секции обмоток создают также вертикальную силу $Z_3 = Z_1 + Z_2$ (табл. 22).

Сила Z_3 при прямом положении судна девиации не создает, но при наличии крена, дифферента, а также на качке создает креновую девиацию.

При изменении курса изменяют величину тока в курсовых секциях обмоток. При наличии автоматического контроллера, работающего от гирокомпыаса, величина тока изменяется плавно. При отсутствии такого автоматического устройства изменение тока в обмотках производят вручную, причем регулировка тока при этом имеет ступенчатый характер.

§ 45. КОМПЕНСИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО (КУС)

Мы установили, что при включении обмоток размагничивания образуются силы, создающие электромагнитную девиацию.

В общем случае, при включении всех секций обмоток, появляются девять сил, из которых три являются продольными, три — поперечными и три — вертикальными.

Табл. 22 показывает классификацию этих сил по двум признакам: по направлению действия и по характеру изменения в зависимости от курса судна.

Т а б л и ц а 22

Зависимость силы от курса	Направление действия силы		
	продольное	поперечное	вертикальное
<i>Постоянные силы</i> , не зависящие от курса и возникающие при включении постоянных и широтных секций всех обмоток	P_3	Q_3	R_3
<i>Силы, пропорциональные косинусу курса</i> , возникающие при включении косинусных секций палубных обмоток . . .	X_1	Y_1	Z_1
<i>Силы, пропорциональные синусу курса</i> , возникающие при включении синусных секций батоксных обмоток	X_2	Y_2	Z_2

При уничтожении электромагнитной девиации компенсируют силы, указанные в табл. 22, причем все силы компенсируют отдельно, независимо друг от друга.

Электромагнитную девиацию уничтожают при помощи специального приспособления, которое называется *компенсирующим устройством* (сокращенно — КУС).

В комплект компенсирующего устройства входят электромагнитный компенсатор и регулировочные потенциометры.

Электромагнитный компенсатор представляет собой систему трех взаимно перпендикулярных соленоидов, помещенных в герметическом корпусе. Электромагнитный компенсатор устанавливается в верхней части нактоуза, под котелком компаса (рис. 101). Центр O_1 электромагнитного компенсатора располагается на одной вертикали с центром компаса O . В каждом соленоиде компенсатора имеется несколько секций: постоянная, косинусная и синусная. Может быть также и широтная секция. Секции соленоидов КУСа подключаются параллельно соответствующим секциям обмоток размагничивания. Величину тока в каждой секции при помощи отдельных потенциометров регулируют так, чтобы обеспечить компенсацию электромагнитных сил в точке O . Ток в соответствующих секциях соленоидов КУСа изменяется автоматически с изменением тока в курсовых или широтных обмотках на пропорциональную величину, так как соленоиды подключены параллельно обмот-

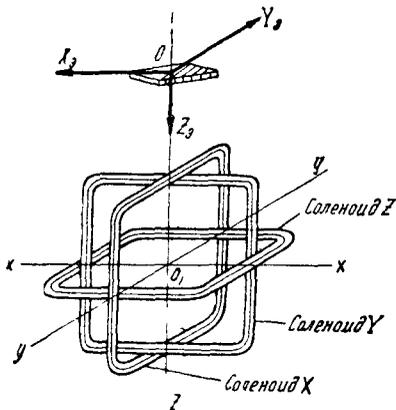


Рис. 101

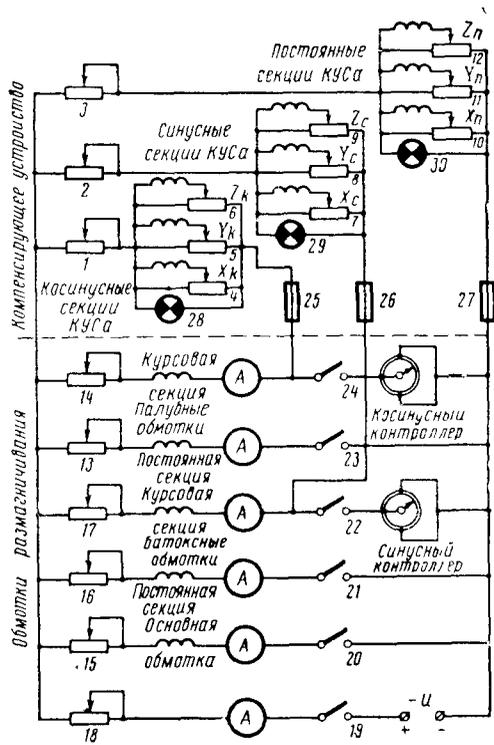


Рис. 102

кам размагничивания. Таким образом, уничтоженная на одном каком-либо курсе электромагнитная девиация будет уничтожаться автоматически и на всех других курсах.

На рис. 102 показана принципиальная электрическая схема КУСа и его подключение к обмоткам размагничивания.

На схеме обозначены:

1—3 — гасительные резисторы;

4—12 — регулировочные потенциометры;

$$\left. \begin{array}{l} X_{\text{к}}; X_{\text{с}}; X_{\text{п}} \\ Y_{\text{к}}; Y_{\text{с}}; Y_{\text{п}} \\ Z_{\text{к}}; Z_{\text{с}}; Z_{\text{п}} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{косинусная, синусная и} \\ \text{постоянная секции} \\ \text{соленоидов;} \end{array}$$

параллельно каждой секции подключены контрольные лампочки 28, 29 и 30;

13—17 — регулировочные реостаты в цепи обмоток размагничивания;

18 — общий регулировочный реостат;

19—24 — выключатели;

25—27 — предохранители;

A — амперметры.

§ 46. УНИЧТОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДЕВИАЦИИ

Уничтожение электромагнитной девиации сводится к компенсации всех сил, возникающих при включении электрических контуров на судне, главным образом обмоток размагничивания.

Уничтожают электромагнитную девиацию на стоянке. Судно может быть ошвартовано у причала или установлено на рейде (на нескольких якорях или бочках).

За время уничтожения электромагнитной девиации курс судна не должен изменяться. Перед уничтожением электромагнитной девиации должны быть уничтожены обычные девиации — четвертная, полукруговая и креновая.

Рассмотрим последовательность работы при уничтожении электромагнитной девиации, когда на судне имеются обмотки размагничивания с тремя секциями — постоянной, косинусной и синусной. При включении этих секций, как мы уже установили, у компаса возникает девять сил (см. табл. 22):

$$\text{Вертикальные силы} \quad \dots \quad Z'_3 = R_3 + Z_1 + Z_2;$$

$$\text{Продольные} \quad \dots \quad X'_3 = P_3 + X_1 + X_2;$$

$$\text{Поперечные} \quad \dots \quad Y'_3 = Q_3 + Y_1 + Y_2.$$

Уничтожение электромагнитной девиации начинают с компенсации вертикальных сил.

Компенсация вертикальных сил $Z'_3 = R_3 + Z_1 + Z_2$. Судовой котелок заменяют креновым котелком. При выключенных обмотках размагничивания (судно — на швартовах, на произвольном курсе) измеряют вертикальную силу Z'_3 , т. е. при помощи дефлектора приводят наклонную картушку в горизонтальное положение. Затем, не снимая дефлектора, включают постоянные секции всех обмоток. При этом появляются три силы: P_3 , Q_3 и R_3 .

Горизонтальные силы P_3 и Q_3 не оказывают влияния на наклонную картушку, но вертикальная сила R_3 выведет стрелки наклонной картушки из горизонтального положения. Регулировкой тока в секции Z_{II} при помощи потенциометра 12 (см. рис. 102) добиваются, чтобы наклонная картушка опять пришла в горизонтальное положение: сила R_3 будет компенсирована.

После этого, не снимая дефлектора и оставляя под током постоянные секции обмоток размагничивания, включают косинусную секцию палубных обмоток, устанавливая косинусным контроллером максимальную величину тока в этой цепи.

При включении косинусной секции появляются силы X_1 , Y_1 и Z_1 . Первые две силы не оказывают влияния, а третья — вертикальная выведет наклонную картушку из горизонтального положения.

Регулировкой тока в секции Z_{II} при помощи потенциометра 6 добиваются, чтобы наклонная картушка снова установилась горизонтально; в результате сила Z_1 будет компенсирована.

Теперь остается компенсировать последнюю вертикальную силу Z_2 . Не снимая дефлектора, выключают косинусную секцию палубных обмоток, оставляя под током постоянные секции всех обмоток размагничивания. Включают синусную секцию батоксных обмоток, устанавливая синусным контроллером максимальный ток в этой цепи. При включении синусной секции появляются силы X_2 , Y_2 и Z_2 . Вертикальная сила Z_2 выведет наклонную картушку из горизонтального положения. Регулировкой тока в секции Z_C при помощи потенциометра 9 восстанавливают горизонтальное положение наклонной картушки; в результате сила Z_2 будет компенсирована.

На этом компенсацию вертикальных сил заканчивают, устанавливают в нактоуз судовой котелок и переходят к компенсации горизонтальных сил X'_3 и Y'_3 .

Компенсация горизонтальных сил X'_3 и Y'_3 . Сущность компенсации горизонтальных электромагнитных сил заключается в следующем.

Пусть во время уничтожения электромагнитной девиации компасный курс судна (при выключенных обмотках) располагается в NE четверти. При включении обмоток размагничивания будут возникать две силы: продольная и поперечная. Так, при включении постоянных секций одновременно появляются продольная сила P и поперечная сила Q_3 (третья — вертикальная сила R_3 уже компенсирована). Компенсировать обе силы сразу невозможно. Чтобы произвести компенсацию одной из них, например продольной P_3 , необходимо создать такие условия, при которых вторая сила Q_3 не оказывала бы влияния на компас. Для этого необходимо искусственным образом при выключенных обмотках расположить стрелку компаса по направлению силы Q_3 , т. е. в поперечной плоскости судна. Для этой цели обычно применяют дефлектор, с помощью которого компенсируют действие продольной составляющей X' . Визирную плоскость пеленгатора с помещенным на его чашку дефлектором устанавливают продольно на отсчет

0° по азимутальному кругу; вспомогательный магнит убирают. Измерительный магнит дефлектора посылает на стрелку силу F , равную по величине силе X' , но обратную по направлению. Стрелка компаса устанавливается в поперечной плоскости судна, по направлению действия силы Y' . Под призмой пеленгатора располагается W катушки компаса.

Если теперь включить постоянные секции обмоток размагничивания, то отклонение стрелки компаса от поперечного направления (или, что то же самое, уход W катушки из-под призмы пеленгатора) будет происходить только под действием возникающей при этом продольной электромагнитной силы P_3 . Поперечная сила Q_3 влияния на стрелку оказывать не будет.

Для компенсации силы P_3 необходимо регулировкой тока в секции X_{II} при помощи потенциометра 10 (см. рис. 102) добиться, чтобы стрелка компаса установилась в поперечной плоскости судна, т. е. W катушки компаса вновь подошел под призму пеленгатора.

Не снимая дефлектора с чашки пеленгатора, включают косинусные секции обмоток размагничивания. При этом возникают также две силы: продольная X_1 и поперечная Y_2 . Но только одна из них (X_1) будет отклонять стрелку компаса от поперечного направления. При компенсации силы X_1 регулируют ток в косинусной секции КУСа (X_{II}) при помощи потенциометра 4. Аналогичным образом при помощи соответствующего потенциометра производят компенсацию продольной силы X_2 , возникающей при включении синусных секций обмоток размагничивания.

После того как продольные электромагнитные силы P_3 , X_1 и X_2 будут компенсированы, остается произвести компенсацию поперечных сил O_3 , Y_1 и Y_2 . Для этого следует установить пеленгатор с помещенным на него дефлектором на отсчет 90° по азимутальному кругу и при выключенных обмотках размагничивания при помощи измерительного магнита дефлектора (без вспомогательного магнита) установить стрелку компаса продольно, т. е. подвести E катушки под призму пеленгатора. Затем надо поочередно включать постоянные, косинусные и синусные обмотки размагничивания и регулировать ток в соленоидах КУСа при помощи соответствующих потенциометров, контролируя компенсацию сил по отклонению катушки компаса.

При компенсации горизонтальных электромагнитных сил обычно в первую очередь компенсируют те проекции, направления которых совпадают с направлением большей судовой проекции. На компасных курсах, близких к N или S , большей проекцией является X' (продольная проекция), и в этом случае сначала компенсируют продольные электромагнитные силы P_3 , X_1 и X_2 . На компасных курсах, близких к E и W , большей проекцией является Y' (поперечная проекция), и тогда в первую очередь компенсируют поперечные силы Q_3 , Y_1 и Y_2 . Следует отметить, что после того, как большая проекция при включенных обмотках доведена до значения, соответствующего выключенным обмоткам, компенсация последних трех проекций может производиться не по дефлектору, а по пеленгу отдаленного предмета. Для

этого замечают пеленг отдаленного предмета $KП_0$ при выключенных обмотках и, включая поочередно различные секции обмоток, регулировкой тока соответствующими потенциометрами КУСа доводят изменяющиеся значения пеленга $KП_1$, $KП_2$, $KП_3$ до первоначальной величины $KП_0$.

Если при уничтожении электромагнитной девиации для компенсации всех горизонтальных сил (продольных X'_s и поперечных Y'_s) применяется дефлектор, то такой метод компенсации называют *способом двух проекций*. Если же при компенсации горизонтальных сил одна из проекций (большая) доводится до надлежащего значения по дефлектору, а вторая (меньшая) — по пеленгу отдаленного предмета, то в этом случае метод имеет другое название: *способ проекции и пеленга*.

Способ двух проекций применяется в тех случаях, когда обе проекции (X' и Y') имеют примерно равную величину, т. е. когда компасный курс судна близок к одному из четвертных курсов (NE, SE, SW, NW).

Способ проекции и пеленга применяется в тех случаях, когда компасный курс судна близок к одному из главных курсов (N, E, S, W).

Следует отметить, что иногда применяется так называемый *способ двух искусственных курсов*. Принципиально он ничем не отличается от способа двух проекций. Разница лишь в том, что при выполнении этого способа компасную стрелку при выключенных обмотках устанавливают в продольной или поперечной плоскости судна любым постоянным магнитом, располагаемым произвольно относительно компаса. Для этой цели могут быть использованы магниты-уничтожители, а также измерительный или вспомогательный магнит дефлектора.

Рассмотрим последовательность действия при выполнении способа двух проекций и способа проекции и пеленга.

С п о с о б д в у х п р о е к ц и й

1. Включают все обмотки размагничивания. Дефлектор, собранный для измерения горизонтальных сил, устанавливают на чашку пеленгатора без вспомогательного магнита и измеряют продольную проекцию X' , т. е. подводят W (или E) картушки под призму пеленгатора. Визирная плоскость пеленгатора перед установкой дефлектора должна быть установлена параллельно диаметральной плоскости судна (отсчет 0° (180°) по азимутальному кругу).

2. Не снимая дефлектора, включают постоянные секции всех обмоток. Появляются силы P_s и Q_s (сила R_s компенсирована раньше). Поперечная сила Q_s не оказывает влияния на картушку, так как направление силы совпадает с осью NS картушки. Продольная сила P_s отклонит картушку, и W(E) картушки уйдет из-под призмы.

Регулировкой тока в секции X_n при помощи потенциометра 10 (см. рис. 102) добиваются, чтобы W(E) картушки снова подошел под призму пеленгатора. При этом сила P_s будет компенсирована.

3. Не снимая дефлектора и оставляя под током постоянные секции всех обмоток, включают косинусную секцию палубных обмоток, устанавливая косинусным контроллером максимальную величину тока в этой цепи. Появляются силы X_1 и Y_1 (сила Z_1 компенсирована раньше). Под действием силы X_1 W (Е) картушки уйдет из-под призмы пеленгатора. Регулировкой тока в секции X_k при помощи потенциометра 4 добиваются, чтобы W (Е) картушки снова подошел под призму. Сила X_1 будет компенсирована.

4. Не снимая дефлектора, выключают косинусную секцию палубных обмоток и включают синусную секцию батоксных обмоток. Появляются силы X_2 и Y_2 . Действуя потенциометром 7, регулируют ток в секции X_c и добиваются компенсации силы X_2 .

5. Выключают все обмотки размагничивания и устанавливают пеленгатор с помещенным на его чашку дефлектором на отсчет 90° (270°) по азимутальному кругу (N измерительного магнита в сторону проекции Y'). Измеряют поперечную проекцию Y' . Затем поочередно включают постоянные и курсовые обмотки и, действуя потенциометрами 11, 5 и 8, компенсируют поперечные силы O_3 , Y_1 и Y_2 , каждый раз доводя величину поперечной проекции при включенных обмотках до первоначального значения Y' , соответствующего выключенным обмоткам.

Способ проекции и пеленга

1. Выключают все обмотки размагничивания. Разворачивают пеленгатор визирной плоскостью по направлению большей проекции, устанавливают дефлектор без вспомогательного магнита и измеряют эту проекцию. Затем, поочередно включая отдельные секции обмоток размагничивания, регулируют ток потенциометром КУСа так, как это было указано в способе двух проекций.

2. Выключают все обмотки размагничивания, снимают с компаса дефлектор и берут компасный пеленг $КП_0$ отдаленного предмета.

3. Включают обмотки в принятой последовательности (сначала постоянная, потом косинусные и синусные). При включении обмоток пеленг отдаленного предмета каждый раз будет изменяться вследствие появления электромагнитных сил, изменяющих величину меньшей проекции. Регулировкой тока соответствующими потенциометрами КУСа добиваются, чтобы изменившийся компасный пеленг ($КП_1$, $КП_2$, $КП_3$) при включенных обмотках размагничивания принимал первоначальное значение ($КП_0$), наблюдаемое при выключенных обмотках.

По окончании уничтожения электромагнитной девиации производится определение остаточной девиации и составляются две рабочие таблицы девиации: одна для включенных и вторая — для выключенных обмоток размагничивания.

Следует отметить, что при ступенчатой регулировке тока в курсовых обмотках кривая остаточной девиации тоже будет ступенчатой, имеющей вид четвертной девиации

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ
МАГНИТНЫХ КОМПАСОВ**

§ 47. ДЕВИАЦИЯ ВЫСШЕГО ПОРЯДКА

В формуле (32)

$$\sin \delta = A' \cos \delta + B' \sin k' + C' \cos k' + D' \sin (2k' + \delta) + E' \cos (2k' + \delta) \quad (142)$$

множители A', B', C', D', E' называются точными коэффициентами девиации. Численно коэффициент A' равен тангенсу девиации, а остальные коэффициенты — синусам максимальных девиаций от соответствующих сил, что было изложено в § 10. Формулу (32) можно разложить в ряд. Такое разложение, представляющее собой довольно сложное математическое преобразование, в полном виде приводится в книге проф. Н. Ю. Рыбалтовского¹.

В результате разложения получается следующее выражение для девиации:

$$\begin{aligned} \delta = & A' + \left[B' \left(1 - \frac{D'}{2} + \frac{D'^2}{4} + \frac{B'^2 + C'^2}{8} \right) - \frac{C' E'}{2} \right] \sin k' + \\ & + \left[C' \left(1 + \frac{D'}{2} + \frac{D'^2}{4} + \frac{B'^2 + C'^2}{8} \right) - \frac{B' E'}{2} \right] \cos k' + D' \sin 2k' + \\ & + (E' + A' D') \cos 2k' + \left(\frac{B' D' - C' E'}{2} - \frac{B'^3}{24} + \frac{B' C'^2}{8} - \frac{3}{8} B' D'^2 \right) \times \\ & \times \sin 3k' + \left(\frac{B' E' + C' D'}{2} + \frac{C'^3}{24} - \frac{C' B'^2}{8} + \frac{3}{8} C' D'^2 \right) \cos 3k' + \\ & + \frac{D'^2}{2} \sin 4k' + D' E' \cos 4k' + \frac{3}{8} B' D'^2 \sin 5k' + \\ & + \frac{3}{8} C' D'^2 \cos 5k' + \frac{D'^3}{3} \sin 6k' + \dots \end{aligned} \quad (143)$$

С другой стороны, девиация δ как периодическая функция компасного курса k' может быть разложена в бесконечный тригонометрический ряд Фурье:

$$\begin{aligned} \delta = f(k') = & A + B \sin k' + C \cos k' + D \sin 2k' + E \cos 2k' + \\ & + F \sin 3k' + G \cos 3k' + H \sin 4k' + K \cos 4k' + \\ & + L \sin 5k' + M \cos 5k' + N \sin 6k' + \dots \end{aligned} \quad (144)$$

Коэффициенты A, B, C, D, E, F, G , стоящие в правой части выражения (144), называются приближенными коэффициентами девиации.

¹ Н. Ю. Рыбалтовский. «Магнитно-компасное дело». М., «Морской транспорт», 1952.

Они выражаются в градусах или радианах. Коэффициенты F, G, H, K, L, M, N и т. д. называются *коэффициентами высшего порядка* (F и G — коэффициенты шестерной девиации, H и K — коэффициенты восьмерной девиации и т. д.).

Сопоставляя выражения (143) и (144), нетрудно получить следующую зависимость между приближенными и точными коэффициентами девиации:

$$\begin{aligned}
 A &= A'; \\
 B &= B' \left(1 - \frac{D'}{2} + \frac{D'^2}{4} + \frac{B'^2 + C'^2}{8} \right) - \frac{C'E'}{2}; \\
 C &= C' \left(1 + \frac{D'}{2} + \frac{D'^2}{4} + \frac{B'^2 + C'^2}{8} \right) - \frac{B'E'}{2}; \\
 D &= D'; \quad E = E' + A'D'; \\
 F &= \frac{B'D' - C'E'}{2} - \frac{B'^3}{24} + \frac{B'C'^2}{8} - \frac{3}{8} B'D'^2 \text{ и т. д.}
 \end{aligned} \tag{145}$$

Можно найти также и обратную зависимость, т. е. выразить точные коэффициенты в зависимости от приближенных коэффициентов.

$$\begin{aligned}
 A' &= A; \\
 B' &= B + \frac{BD}{2} - \frac{B^3}{8} - \frac{BC^2}{8} + \frac{CE}{2}; \\
 C' &= C - \frac{CD}{2} - \frac{C^3}{8} - \frac{CB^2}{8} + \frac{BE}{2}; \\
 D' &= D; \\
 E' &= E - AD.
 \end{aligned} \tag{146}$$

На основании выражения (146) можно получить зависимость между коэффициентами высшего порядка и первыми пятью приближенными коэффициентами:

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{BD}{2} - \frac{B^3}{24} + \frac{BC^2}{8} - \frac{BD^2}{8} - \frac{CE}{2}; \\
 G &= \frac{CD}{2} + \frac{C^3}{24} - \frac{CB^2}{8} + \frac{CD^2}{8} + \frac{BE}{2}; \\
 H &= \frac{D^2}{2}; \\
 K &= DE; \\
 L &= \frac{3}{8} BD^2; \\
 M &= \frac{3}{8} CD^2; \\
 N &= \frac{D^3}{3} \text{ и т. д.}
 \end{aligned} \tag{147}$$

Формулы (147) позволяют решить очень важную задачу: с их помощью можно отыскать условия, при которых коэффициенты высшего

порядка $F, G, H, K, L, M, N \dots$ будут иметь ничтожную величину и ими можно пренебрегать.

После уничтожения девиации приближенные коэффициенты B, C и D обычно не превышают $1,0-1^{\circ},5$ или — в отвлеченной мере — $0,026$. Примем это число за величину II порядка малости. Величина I порядка при таком условии будет равна $\sqrt{0,026}=0,162$, что соответствует примерно 9° .

Коэффициенты A и E в таком случае можно считать величинами III порядка малости, так как их значения обычно не превышают $0,25-0^{\circ},30$ (в отвлеченной мере $0,004-0,005$); тогда

$$\underbrace{0,004}_{\text{III пор.}} = \underbrace{0,026}_{\text{II пор.}} \cdot \underbrace{0,162}_{\text{I пор.}}$$

Исходя из этих условий, проведем анализ выражений для коэффициентов высшего порядка:

$$F = \frac{BD}{2} - \frac{CE}{2} - \frac{B^3}{24} + \dots; \quad G = \frac{CD}{2} + \frac{BE}{2} + \frac{C^3}{24} - \dots$$

$$H = \frac{D^2}{2}; \quad K = DE; \quad L = \frac{3}{8} BD^2; \quad M = \frac{3}{8} CD^2; \quad N = \frac{D^3}{2}.$$

Как видим, при заданных условиях коэффициенты F, G, H, K, L, M, N и т. д. имеют IV, V, VI порядок малости. Это значит, что если приближенные коэффициенты A, B, C, D, E менее $1^{\circ},5$, то коэффициенты высшего порядка F, G, H, K, L, M, N и т. д. по своей величине будут превышать $0^{\circ},05$.

Действительно:

коэффициенты F, G, H	(IV порядок малости) $0,0261^2 = 0,0007 (\cong 0^{\circ},05)$;
коэффициент K	(V порядок малости) $0,0007 \cdot 0,1616 = 0,0006 (\cong 1')$;
коэффициенты L, M, N	(VI порядок малости) \approx равны нулю.

Практически в этих случаях коэффициентами высших порядков можно пренебрегать и для расчета девиации достаточно пользоваться приближенной формулой, ограниченной пятью членами разложения:

$$\delta = A + B \sin k' + C \cos k' + D \sin 2k' + E \cos 2k'.$$

Такое ограничение возможно, когда коэффициенты B, C, D менее $1^{\circ},5$, коэффициенты A и E менее $0^{\circ},3$, а остаточная девиация на любом курсе не превышает 4° :

$$\delta = [0^{\circ},3 + 1^{\circ},5 \sin k' + 1^{\circ},5 \cos k' + 1^{\circ},5 \sin 2k' + 0^{\circ},3 \cos 2k'] < 4^{\circ}.$$

На этом основании после уничтожения девиации обычно рассчитывают только первые пять приближенных коэффициентов девиации по наблюдениям на восьми компасных курсах.

Можно показать, что при остаточных девиациях $15 \div 20^\circ$ коэффициенты высших порядков достигают ощутимых значений (более $0^\circ, 2$), и ими пренебрегать нельзя. В этих случаях таблицу девиации составляют не по 5 коэффициентам, а по 12, которые рассчитывают по наблюдениям на 16 компасных курсах.

Необходимо помнить, что все приводимые выше зависимости между коэффициентами высшего порядка и первыми пятью коэффициентами являются действительными только при условии однородности магнитного поля в объеме, занимаемом компасными стрелками.

Однородность поля обеспечивается двумя способами:

за счет удаления магнитов и железных масс на достаточное расстояние от компаса;

за счет рационального устройства магнитной системы компаса.

Если вблизи компаса располагаются железные массы, а магнитная система не имеет рационального устройства, то зависимость между коэффициентами будет совсем иной, чем в выражениях (145), (146), (147), хотя формула девиации (144) будет иметь прежний вид ряда Фурье.

§ 48. РАЦИОНАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ КОМПАСА

У современных магнитных компасов, как правило, магнитная система имеет не одну, а несколько стрелок, расположенных в определенном порядке. Как увидим ниже, наличие нескольких стрелок в картушке компаса позволяет устанавливать компас в непосредственной близости к железным массам, что очень важно для современных транспортных судов. Любой магнитный компас, установленный на судне, в той или иной степени должен быть снабжен магнитами-уничтожителями и мягким в магнитном отношении железом для уничтожения девиации. Эти магниты и мягкое железо устанавливают на небольшом расстоянии от магнитной системы компаса. Тогда магнитное поле в объеме, занимаемом картушкой компаса, становится неоднородным. Если вместо картушки с несколькими стрелками на современном компасе установить одну стрелку большого размера, то зависимость между коэффициентами высших порядков с первыми пятью приближенными коэффициентами ряда (144) будет совершенно иной, чем в выражении (147). Все рассуждения, приведенные в предыдущем параграфе, при наличии неоднородного поля и картушки с одной стрелкой будут недействительными. Коэффициенты высших порядков F, G, H, K при данном условии могут иметь значительную величину даже в том случае, если первые пять коэффициентов A, B, C, D, E равны нулю. Иначе говоря, коэффициенты высшего порядка становятся независимыми от первых пяти коэффициентов ряда Фурье.

Можно доказать, что точная формула девиации в этом случае будет иметь следующий вид¹:

¹ Вывод этой формулы приводится П. А. Домогаровым в его труде «Теоретическая девиация». Записки по гидрографии. Т. 44, 1921.

$$\sin \delta = B'' \sin k' + C'' \cos k' + D'' \sin 2k'' + E'' \cos 2k' + \\ + F'' \sin 3k' + G'' \cos 3k' + H'' \sin 4k' + \dots \quad (148)$$

В этой формуле коэффициенты B'' , C'' , D'' , E'' , F'' называются *истинными коэффициентами девиации*. Их величины зависят от отношения полудлины l стрелки к расстоянию r до возмущающей массы.

Рассмотрим уничтожение полукруговой и четвертной девиаций при наличии у компаса одной стрелки. Устанавливая в нактоузе магниты-уничтожители и уничтожая полукруговую девиацию, мы выполняем условие:

$$B'' = -B'; \quad C'' = -C',$$

где B'' и C'' — полукруговые истинные коэффициенты от магнитов-уничтожителей;

B' и C' — полукруговые точные коэффициенты от твердого судового железа.

Полукруговая девиация будет уничтожена магнитами-уничтожителями, но этими же магнитами вследствие их близости к стрелке компаса будет создана девиация высшего порядка, определяемая истинными коэффициентами F'' , G'' (шестерная девиация), L'' , M'' (десятерная девиация) и т. д.

Устанавливая около компаса бруски мягкого железа и уничтожая четвертную девиацию, мы выполняем условие:

$$D'' = -D'; \quad E'' = -E',$$

где D'' и E'' — четвертные истинные коэффициенты от брусков мягкого железа;

D' и E' — четвертные точные коэффициенты от судового мягкого железа.

Четвертная девиация будет уничтожена брусками мягкого железа, но этими же брусками будет создана девиация высшего порядка, определяемая истинными коэффициентами H'' , K'' (восьмерная девиация), N'' , P'' (двенадцатерная девиация) и т. д.

Необходимо помнить, что истинные коэффициенты не являются какими-то новыми и обособленными величинами, это коэффициенты того же ряда Фурье, но только с другой функциональной зависимостью. При весьма малой длине стрелки, когда отношение l/r близко к нулю, истинные коэффициенты превращаются в уже известные нам точные коэффициенты. Практически на судне трудно установить, с какими коэффициентами мы имеем дело.

Исследования показывают, что большие по величине девиации высшего порядка появляются не только в том случае, когда компасная стрелка находится в неоднородном поле, но и при несовпадении ее магнитного центра с центром вращения (продольный или поперечный сдвиг). Вот почему конструктивное выполнение стрелки должно быть строгим, обеспечивающим ее полную магнитную и геометрическую симметрию относительно общего центра.

Чтобы компас не имел девиаций высшего порядка от неоднородности поля, необходимо уменьшить размеры стрелки. Но тогда уменьшается и магнитный момент, что неприемлемо. Есть другой путь борьбы с девиациями высшего порядка — создание рациональной магнитной системы компаса: вместо одной стрелки в картушке компаса устанавливают две, четыре или шесть стрелок.

Необходимым условием рационально устроенной картушки является симметричное расположение так называемых эквиполусов¹ стрелок на одной окружности с центром в центре картушки. Картушка с одной парой стрелок (рис. 103) позволяет уничтожить шестерную и восьмерную

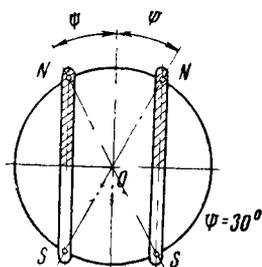


Рис. 103

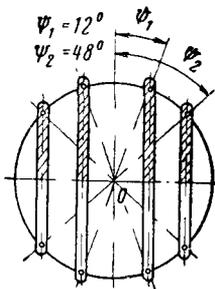


Рис. 104

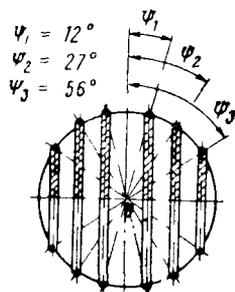


Рис. 105

девиации. На рис. 103 показано расположение стрелок, определяемое углом $\psi = 30^\circ$. Угол ψ образуется направлением продольной оси симметрии и направлением на эквиполусы стрелок из центра картушки.

Картушки с двумя парами стрелок (рис. 104) уничтожают девиацию высшего порядка до двенадцатерной включительно.

Расположение стрелок в картушке с двумя парами стрелок определяется (по Колонгу) углами:

$$\psi_1 = 12^\circ \text{ и } \psi_2 = 48^\circ.$$

Картушка с тремя парами стрелок (рис. 105) позволяет уничтожать девиацию высшего порядка до шестнадцатерной включительно.

Расположение стрелок определяется (по Домогарову) углами:

$$\psi_1 = 12^\circ; \psi_2 = 27^\circ \text{ и } \psi_3 = 56^\circ.$$

Интересно отметить, что длина одиночной стрелки должна быть в 23 раза меньше диаметра окружности шестистрелочной рациональной магнитной системы, чтобы выполнялось условие эквивалентности в отношении девиаций высшего порядка.

Магнитный компас отечественного производства имеет магнитную систему с тремя парами стрелок, расположение которых определяется углами:

$$\psi_1 = 15^\circ 12', \psi_2 = 29^\circ 32' \text{ и } \psi_3 = 45^\circ 10'.$$

¹ Расстояние $2l$ между эквиполусами примерно равно $0,85$ геометрической длины L стрелки: $2l = 0,85L$.

Такое расположение стрелок позволяет уничтожить девиации высшего порядка и одновременно обеспечивает равенство моментов инерции относительно осей NS и EW. Последнее условие играет большую роль при обеспечении хороших динамических качеств компаса.

§ 49. ДИНАМИКА КАРТУШКИ

Помимо магнитных сил, на картушку компаса воздействуют механические силы, возникающие от качки, сотрясений и вибрации корпуса судна, в результате чего картушка начинает колебаться, причем колебания происходят и в горизонтальной, и в вертикальной плоскостях. При колебаниях картушки в горизонтальной плоскости в результате непосредственного воздействия механических сил появляются так называемые *механические девиации*.

При колебаниях картушки в вертикальной плоскости на нее начинают действовать дополнительные магнитные силы, отклоняющие систему стрелок от магнитного меридиана. В результате этого появляются *магнитно-механические девиации*.

Механические и магнитно-механические девиации являются динамическими величинами, непрерывно меняющимися в зависимости от механических воздействий на компас. Такие девиации нельзя учесть с помощью таблиц.

Рассмотрим явление механических девиаций. Пусть картушка (или стрелка) компаса вследствие механического воздействия отклонилась в горизонтальной плоскости на угол δ от магнитного меридиана. Составим уравнение движения, используя известный закон механики: произведение момента инерции I относительно оси вращения на угловое ускорение $\ddot{\delta}$ равно сумме моментов P всех сил относительно той же оси:

$$I\ddot{\delta} = -P,$$

где $P = MH \sin \delta$ (при малых отклонениях $P = MH\delta$).
Здесь M — магнитный момент картушки (стрелки);

H — напряженность магнитного поля.

Пренебрегая силами сопротивления среды и трения в опоре, можно написать уравнение движения картушки

$$I\ddot{\delta} + MH\delta = 0,$$

которое является линейным однородным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами I и MH .

Обозначим

$$\frac{MH}{I} = n^2,$$

тогда получим дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний:

$$\ddot{\delta} + n^2\delta = 0.$$

Общий интеграл этого уравнения представляется в следующем виде:

$$\delta = C_1 \cos nt + C_2 \sin nt, \quad (149)$$

где C_1 и C_2 — произвольные постоянные.

Определим значения коэффициентов C_1 и C_2 по начальным условиям:

$$\text{при } t=0; \delta = \delta_{\max}; \dot{\delta} = 0,$$

т. е. картушка в начальный момент отклонена от положения равновесия на максимальный угол.

Имеем:

$$\delta_{\max} = C_1 \cos 0^\circ + C_2 \sin 0^\circ,$$

откуда

$$C_1 = \delta_{\max}; C_2 = 0.$$

Следовательно,

$$\delta = \delta_{\max} \cos nt,$$

или, подставляя значение n :

$$\delta = \delta_{\max} \cos \left(t \sqrt{\frac{MH}{I}} \right).$$

Полученное решение показывает, что картушка магнитного компаса после какого-либо механического воздействия при выбранных начальных условиях совершает гармонические незатухающие колебания с круговой частотой n (периодом $T_0 = \frac{2\pi}{n}$) и амплитудой δ_{\max} .

В действительности, однако, движение картушки будет более сложным, так как на него оказывают влияние сила трения в опоре и сила сопротивления среды, в которой находится картушка.

Рассмотрим вначале поведение картушки под влиянием силы сухого (Кулонова) трения в опоре.

Обозначим момент этой силы через Q . Момент Q действует всегда противоположно направлению угловой скорости картушки δ . Таким образом, уравнение движения картушки под действием момента Q можно написать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} I\delta + MH\ddot{\delta} - Q = 0 & \text{ при } \dot{\delta} > 0 \\ I\delta + MH\ddot{\delta} + Q = 0 & \text{ при } \dot{\delta} < 0 \end{aligned} \right\}. \quad (150)$$

В течение первого полупериода колебаний картушки, пока $\dot{\delta} > 0$ будет справедливо первое уравнение (150); в течение второго полупериода (при $\dot{\delta} < 0$) — второе. Общее решение первого уравнения имеет вид:

$$\delta = C_1 \cos nt + C_2 \sin nt + \frac{Q}{MH} \quad (151)$$

или при принятых нами ранее начальных условиях:

$$\delta = \left(\delta_{\max} - \frac{Q}{MH} \right) \cos nt + \frac{Q}{MH}.$$

В конце первого полупериода при $t = \frac{T_0}{2} = \frac{\pi}{n}$ отклонение катушки

$$\delta_1 = \left(\delta_{\max} - \frac{Q}{MH} \right) \cos \pi + \frac{Q}{MH} = - \left(\delta_{\max} - 2 \frac{Q}{MH} \right).$$

После этого вступает в силу второе уравнение, решение которого имеет вид:

$$\delta = C_1 \cos nt + C_2 \sin nt - \frac{Q}{MH}. \quad (152)$$

Начальные условия для этого решения, очевидно, будут:

$$t = \frac{\pi}{n}; \quad \delta = \delta_1; \quad \dot{\delta} = 0,$$

откуда

$$\delta = - \left(- \delta_1 - \frac{Q}{MH} \right) \cos nt - \frac{Q}{MH}$$

или

$$\delta = \left(\delta_{\max} - \frac{3Q}{MH} \right) \cos nt - \frac{Q}{MH}.$$

В конце второго полупериода при $t = T_0 = \frac{2\pi}{n}$ отклонение катушки будет равно

$$\delta_2 = \left(\delta_{\max} - \frac{3Q}{MH} \right) \cos 2\pi - \frac{Q}{MH} = \delta_{\max} - \frac{4Q}{MH}.$$

Таким образом, последовательные максимальные отклонения катушки будут выражаться следующим рядом:

$$\begin{aligned} t = 0 & \quad \delta = \delta_{\max}; \\ t = \frac{T_0}{2} = \frac{\pi}{n} & \quad \delta = - \left(\delta_{\max} - 2 \frac{Q}{MH} \right); \\ t = T_0 = \frac{2\pi}{n} & \quad \delta = \delta_{\max} - \frac{4Q}{MH} \text{ и т. д.} \end{aligned} \quad (153)$$

Легко убедиться, что амплитуды колебаний катушки уменьшаются в арифметической прогрессии со знаменателем $2 \frac{Q}{MH}$, т. е. колебания постепенно затухают. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока амплитуда колебаний катушки не станет меньше ве-

личины $\frac{Q}{MH}$. После этого колебания прекратятся, катушка остановится в некоторой зоне, угловая величина которой равна $\pm \frac{Q}{MH}$.

Эта величина называется зоной застоя катушки магнитного ком-паса.

Зона застоя будет тем меньше, чем меньше трение в опоре Q и чем больше магнитный момент катушки M . В низких широтах, где величина H больше, чем в высоких, зона застоя катушки уменьшается.

Рассмотрим теперь влияние сопротивления среды, в которой находится катушка, на характер колебаний катушки. При этом для упрощения не будем учитывать влияние сухого трения в опоре.

Момент сопротивления среды пропорционален первой степени угловой скорости δ .

Уравнение колебаний катушки с учетом сопротивления среды будет иметь следующий вид:

$$I\ddot{\delta} + a\dot{\delta} + MH\delta = 0,$$

где a — коэффициент пропорциональности, характеризующий сопротивление вязкой среды.

Или

$$\ddot{\delta} + 2h\dot{\delta} + n^2\delta = 0,$$

где

$$2h = \frac{a}{I}; \quad n^2 = \frac{MH}{I}. \quad (154)$$

Общий интеграл последнего дифференциального уравнения (154) равен

$$\delta = e^{-ht} (C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t}), \quad (155)$$

где α_1 и α_2 — корни характеристического уравнения:

$$\alpha_1 = -h + \sqrt{h^2 - n^2}; \quad \alpha_2 = -h - \sqrt{h^2 - n^2}.$$

Характер движения катушки зависит от вида корней характеристического уравнения. Могут быть два случая.

Первый случай. $h < n$ — интенсивность сопротивления среды меньше интенсивности действия направляющей силы. В этом случае решением дифференциального уравнения будет выражение

$$\delta = \delta_{\max} \cdot e^{-ht} \cos qt, \quad (156)$$

где

$$q = \sqrt{n^2 - h^2}.$$

Это уравнение гармонических затухающих колебаний с периодом

$$T_3 = \frac{2\pi}{q} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{MH}{I} - \left(\frac{a}{2I}\right)^2}}$$

На рис. 106 показан график затухающих колебаний катушки магнитного компаса с периодом $T_3 = \frac{2\pi}{q}$ и отмечена зона застоя $\left(\frac{Q}{MH}\right)$.

С помощью графика можно определить фактор затухания f , равный отношению двух последующих амплитуд:

$$f = \frac{\alpha_0}{\alpha_1} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \dots \quad (157)$$

Натуральный логарифм фактора затухания ($\ln f$) называется логарифмическим декрементом затухания.

Зная фактор затухания f и период затухающих колебаний T_3 , полученные опытным путем, с помощью графика (рис. 107) можно рас-

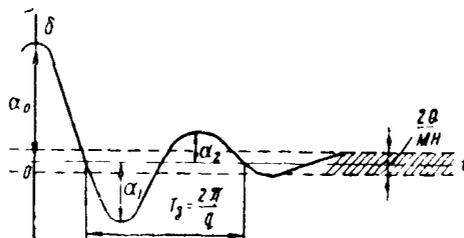


Рис. 106

считать коэффициент затухания h , входящий в уравнение (154). Для этого применяют формулу

$$h = \frac{2 \ln f}{T_3} \quad (158)$$

Формулу (158) можно получить, подставив в формулу (157) значения $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ из равенства (156), взяв промежутки времени через $\frac{1}{2}T_3$.

$$t_0 = 0 \dots \alpha_0 = \delta_{\max} e^{-h \cdot 0} (\cos q \cdot 0) = \delta_{\max};$$

$$t_1 = \frac{1}{2} T_3 \dots \alpha_1 = \delta_{\max} e^{-h \frac{T_3}{2}} \cos \left(q \frac{T_3}{2} \right) = \delta_{\max} e^{-h \frac{T_3}{2}};$$

$$t_2 = T_3 \dots \alpha_2 = \delta_{\max} e^{-h T_3} \cos (q T_3) = \delta_{\max} e^{-h T_3}.$$

Следовательно,

$$f = \frac{\alpha_0}{\alpha_1} = \frac{\delta_{\max}}{\delta_{\max} e^{-h \frac{T_3}{2}}} = e^{h \frac{T_3}{2}};$$

$$\ln f = \frac{h T_3}{2},$$

откуда

$$h = \frac{2 \ln f}{T_3}.$$

Второй случай. $h \geq n$ — интенсивность сопротивления среды равна или больше интенсивности действия направляющей силы.

Для этого случая решением дифференциального уравнения будет

$$\delta = e^{-ht} (C_1 + C_2) \frac{1}{2} e^{qt}.$$

В этом выражении множитель e^{-ht} со временем убывает, а множитель e^{qt} возрастает. Но, так как $h > q$, множитель e^{-ht} убывает значительно быстрее, чем множитель e^{qt} возрастает.

В результате угол δ будет плавно уменьшаться до тех пор, пока картушка не придет в полосу застоя и остановится. Если полоса застоя невелика, картушка практически устанавливается по направлению магнитного меридиана ($\delta = 0$). Такое движение, когда отклоненная картушка приходит в положение равновесия без колебаний называется *апериодическим*.

В морских судовых компасах имеет место первый случай: картушка совершает периодические колебания. В авиационных магнитных компасах, как правило, наблюдается второй: апериодическое затухающее колебание картушки.

Мы рассмотрели вопрос свободных колебаний картушки, появляющихся в результате внешнего механического воздействия на нее. Кроме того, картушка магнитного компаса может иметь вынужденные колебания, возникающие вследствие сил инерции на качке.

Если магнитный компас находится под влиянием каких-либо переменных возмущений $x(t)$, уравнение движения картушки (без учета сухого трения в опоре) имеет вид:

$$I\ddot{\delta} + a\dot{\delta} + MH\delta = x(t)$$

или

$$T^2\ddot{\delta} + 2mT\dot{\delta} + \delta = k \cdot x(t), \quad (159)$$

где $T = \sqrt{\frac{1}{MH}} = \frac{1}{n}$ — постоянная времени картушки как динамического звена;

$m = \frac{a}{2MHT} = \frac{h}{n}$ — относительный коэффициент затухания;

$k = \frac{1}{MH}$ — коэффициент передачи.

Уравнение (159) можно записать в символической форме:

$$(T^2p^2 + 2mTp + 1)\delta = k \cdot x(t), \quad (160)$$

где p — символ дифференцирования.

$$p = \frac{d}{dt}; \quad p^2 = \frac{d^2}{dt^2}; \quad p\delta = \frac{d\delta}{dt} = \dot{\delta}; \quad p^2\delta = \ddot{\delta}.$$

Из уравнения (160) можно найти *передаточную функцию* магнитного компаса $W(p)$, которая является отношением сигнала δ , наблю-

даемого на выходе динамического звена, к выходному сигналу $x(t)$, т. е.

$$W(p) = \frac{\delta}{x(t)} = \frac{k}{T^2 p^2 + 2mTp + 1}. \quad (161)$$

По виду передаточной функции, заменяя символ p на $i\omega^*$, записывают частотную характеристику

$$W(i\omega) = \frac{k}{T^2(i\omega)^2 + 2mTi\omega + 1}. \quad (162)$$

После алгебраических преобразований частотная функция может быть записана в комплексном виде:

$$\begin{aligned} W(i\omega) &= \frac{k(1 - T^2\omega^2)}{(1 - T^2\omega^2)^2 + 4m^2T^2\omega^2} - \frac{2kmTi\omega}{(1 - T^2\omega^2)^2 + 4m^2T^2\omega^2} = \\ &= R(\omega) - iQ(\omega). \end{aligned} \quad (163)$$

Частотная функция, записанная в комплексном виде, позволяет сразу, не решая уравнения (159), отыскать две важные характеристики динамического звена: амплитудную и фазовую характеристики:

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \sqrt{R^2 + Q^2}; \\ \psi(\omega) &= \arctg \frac{Q}{R}. \end{aligned}$$

Для катушки магнитного компаса получаем:

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1 - T^2\omega^2 + 4m^2T^2\omega^2}}. \quad (164)$$

$$\psi(\omega) = -\arctg \frac{2mT\omega}{1 - T^2\omega^2}. \quad (165)$$

Через амплитудную и фазовую характеристики можно найти закон вынужденных колебаний катушки под влиянием возмущений $x(t) = x_0 \sin \omega t$:

$$\delta = Ax_0 \sin(\omega t + \psi) = \delta_B \sin(\omega t + \psi).$$

Проанализируем выражение амплитуды вынужденных колебаний катушки:

$$\delta_B = Ax_0 = \frac{k}{\sqrt{(1 - T^2\omega^2) + 4m^2T^2\omega^2}} \cdot x_0. \quad (166)$$

При нулевой ($\omega = 0$) или небольшой частоте возмущения ($\omega \ll \ll \frac{1}{T}$) в знаменателе формулы (166) можно пренебречь членами $T^2\omega^2$

* ω — угловая частота возмущений периодического характера $x(t) = x_0 \sin \omega t$;

$$i = \sqrt{-1}.$$

и $4m^2T^2\omega^2$. Поэтому

$$\delta_B = kx_0 = \frac{x_0}{MH} = \delta_{ст},$$

где $\delta_{ст}$ — статическое отклонение картушки компаса (постоянная девиация) при $\omega \rightarrow 0$.

С увеличением частоты возмущения амплитуда δ_B возрастает и достигает максимума примерно при резонансной частоте возмущений

$$\omega = \frac{1}{T} :$$

$$\delta_B = \delta_{max} = \frac{k}{\sqrt{4m^2}} = \frac{\sqrt{T}}{n\sqrt{MH}} \cdot x_0. \quad (167)$$

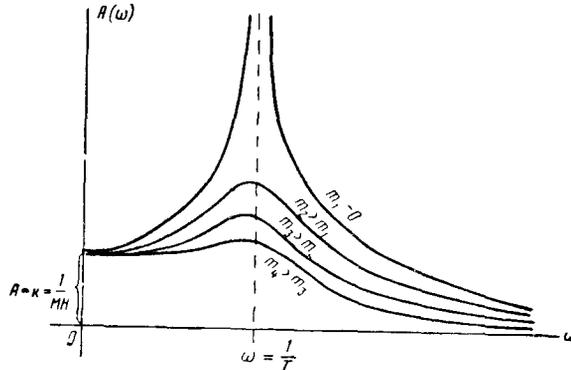


Рис 107

При очень большой частоте возмущений ($\omega \gg \frac{1}{T}$) в знаменателе выражения (166) можно принимать в расчет только наибольший член $T^4\omega^4$, тогда

$$\delta_B \cong \frac{k}{\sqrt{T^4\omega^4}} \cong \frac{1}{T\omega^2} x_0 = 0$$

(при $\omega \rightarrow \infty$).

Зависимость амплитудной характеристики A от частоты возмущений ω при разных значениях m показана на графике, изображенном на рис. 107.

С целью уменьшения восприимчивости магнитного компаса к периодическим возмущениям (качка, рыскание и т. п.) при проектировании компаса стараются выполнить условие $\omega < \frac{1}{T}$. Кроме того,

для уменьшения величины $\delta_{ст} = \frac{x_0}{MH}$ увеличивают магнитный мо-

мент картушки компаса M . Чтобы при этом сохранить без изменения величину относительного коэффициента затухания $m = \frac{a}{2MHT} = \frac{a}{2\sqrt{IMH}}$, одновременно с увеличением магнитного момента M необходимо пропорционально уменьшить момент инерции картушки I или же несколько увеличить коэффициент вязкого трения a .

Чтобы магнитный компас был мало чувствителен к магнитным воздействиям и не имел механических и магнитно-механических девиаций, необходимо картушку соответствующим образом стабилизировать.

Из многих методов стабилизации картушки следует отметить четыре основных:

приведение центра тяжести картушки в точку опоры;

соблюдение равенства моментов инерции картушки относительно диаметров NS и EW;

выбор рационального соотношения между величиной магнитного момента M , моментом инерции I и периодом колебаний T ;

гироскопическая стабилизация (в гиромагнитных компасах).

§ 50. ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНОГО КОМПАСА В КОМПЛЕКСНЫХ СИСТЕМАХ КУРСУКАЗАНИЯ

На морском флоте применяют два основных курсоуказателя — магнитный компас и гироскопический. Оба этих прибора совершенствуются и становятся все более точными и надежными. Однако и магнитный и гироскопический датчики имеют недостатки. Магнитный компас, являясь более автономным по сравнению с гироскопическим прибором, подвержен воздействиям со стороны магнитных полей и требует периодического уничтожения и определения девиации. Кроме того, он менее устойчив при механических воздействиях, имеет значительный застой в высоких широтах.

Гироскопический компас зависит от судовой сети электропитания, имеет температурные ограничения, инерционные погрешности после маневра и т. п.

Следует также иметь в виду следующее: магнитный компас перестает действовать в районе магнитного полюса, а гироскопический «теряет» направляющий момент вблизи географического полюса.

Наличие на морском судне двух разных компасов повышает надежность курсоуказания, но для этого необходимо производить частое сличение приборов. Это позволяет взаимно корректировать компасы и вовремя обнаруживать выход из строя одного из приборов.

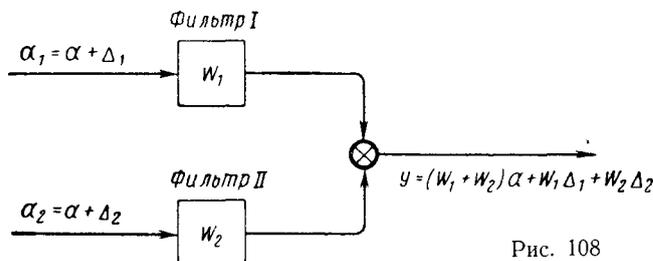
Соединение двух датчиков курса в единую комплексную систему курсоуказания позволяет получить качественно новый прибор, обладающий достоинствами, которые имеет каждый датчик в отдельности, и в то же время свободный от некоторых их недостатков. Соединение этих приборов в единый комплекс не отражается на работе каждого отдельного датчика: в случае отказа какого-либо элемента

системы датчики остаются самостоятельными курсоуказателями, не зависимыми один от другого.

Простейшая схема комбинированной системы курсоказания — это два датчика (магнитный и гироскопический), поочередно подключаемые на общий репитер.

С появлением дистанционных магнитных компасов такая схема с общим репитером внедряется на отдельных морских судах. Недостаток этой схемы — раздельное использование датчиков, что не может дать системе каких-либо новых качеств.

Другой принцип построения комплексной системы основан на фильтрации высокочастотных и низкочастотных помех. Этот принцип может быть реализован в том случае, когда датчики имеют различные динамические свойства.



Рассмотрим схему комплексирования магнитного и гироскопического компасов, которые с позиций автоматики являются датчиками двух сигналов:

$$\alpha_1 = \alpha + \Delta_1(t); \quad \alpha_2 = \alpha + \Delta_2(t),$$

где α — полезный сигнал (истинный курс судна);
 $\Delta_1(t)$ и $\Delta_2(t)$ — ошибки датчиков.

Ошибки $\Delta_1(t)$ и $\Delta_2(t)$ можно представить в следующем виде:

$$\Delta_1(t) = \beta_1(t) + \gamma_1(t); \quad \Delta_2(t) = \beta_2(t) + \gamma_2(t),$$

где $\beta_1(t)$ и $\beta_2(t)$ — высокочастотные составляющие;

$\gamma_1(t)$ и $\gamma_2(t)$ — низкочастотные составляющие погрешности датчиков.

Ошибка $\beta_1(t)$ обусловлена динамическими свойствами катушки магнитного компаса. Она может быть представлена как гармоническая (или случайная) функция определенной, высокой угловой частоты ω_1 порядка $0,2 \div 1,0 \text{ сек}^{-1}$. Причина таких колебаний — внешние воздействия на катушку со стороны корпуса судна. Наличие динамической погрешности $\beta_1(t)$ затрудняет использование магнитного компаса.

Ошибка $\gamma_1(t)$, лежащая в спектре низких частот, обусловлена влиянием магнитного склонения и девиации. На ограниченных отрезках времени эта погрешность может считаться постоянной величиной, т. е. помехой нулевой частоты.

Ошибка $\beta_2(t)$ — это высокочастотные колебания гирокомпаса, вызванные, например, следящей системой. Частота таких колебаний лежит в диапазоне $1—3 \text{ сек}^{-1}$. Ошибка $\gamma_2(t)$ — это низкочастотные колебания с периодом порядка 100 мин (частота $\omega_2 \approx 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$), обусловленные влиянием маневрирования на компас (инерционная девиация гирокомпаса).

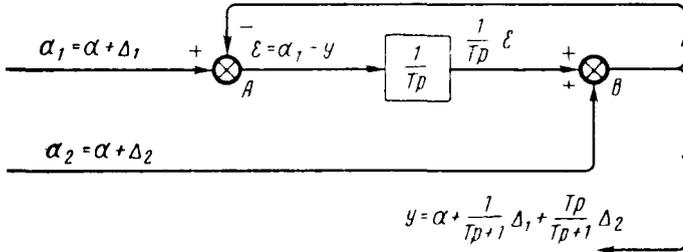


Рис. 109

На рис. 108 показана структурная схема комплексирования магнитного компаса, основанная на фильтрации погрешностей двумя фильтрами с передаточными функциями W_1 и W_2 . После прохождения фильтров сигналы суммируются. Выходной сигнал y имеет вид:

$$y = (W_1 + W_2) \alpha + W_1 \Delta_1 + W_2 \Delta_2.$$

Это выражение показывает, что передаточные функции W_1 и W_2 должны удовлетворять следующим условиям:

фильтр I (W_1) должен подавлять помеху $\Delta_1(t)$;

фильтр II (W_2) должен подавлять помеху $\Delta_2(t)$;

фильтры не должны исказить полезный сигнал, т. е. должно выполняться условие инвариантности по отношению к полезному сигналу:

$$W_1 + W_2 = 1.$$

На рис. 109 представлен один из возможных вариантов структурной схемы комплексирования, где выполняются указанные условия. Схема состоит из звена с передаточной функцией $W = \frac{1}{Tp}$ и двух сумматоров A и B. На выходе системы образуется сигнал

$$y = \alpha + \frac{1}{Tp+1} + \frac{Tp}{Tp+1} \Delta_2,$$

который представляет собой сумму, состоящую из истинного значения измеряемой величины α (истинный курс) и двух ошибок, значения которых по сравнению с первоначальными величинами Δ_1 и Δ_2 изменены фильтрами

$$W_1 = \frac{1}{Tp+1} \quad \text{и} \quad W_2 = \frac{Tp}{Tp+1}.$$

Фильтр W_1 представляет собой инерционное звено (интегратор), а W_2 — дифференцирующее звено с некоторой инерционностью.

На рис. 110 показаны графики $L_1(\omega)$ и $L_2(\omega)$ логарифмических амплитудно-частотных характеристик, построенные в соответствии с выражениями W_1 и W_2 .

Анализируя графики, убеждаемся, что высокочастотные колебания помехи $\beta_1(t)$ — колебания магнитной стрелки — на выход системы не проходят, а низкочастотные и постоянные $\gamma_1(t)$ — склонение и девиация — проходят без искажения.

В отношении помехи $\Delta_2(t) = \beta_2(t) + \gamma_2(t)$ наоборот: низкочастотная ошибка $\gamma_2(t)$ не пропускается, а высокочастотные колебания $\beta_2(t)$ проходят на выход системы.

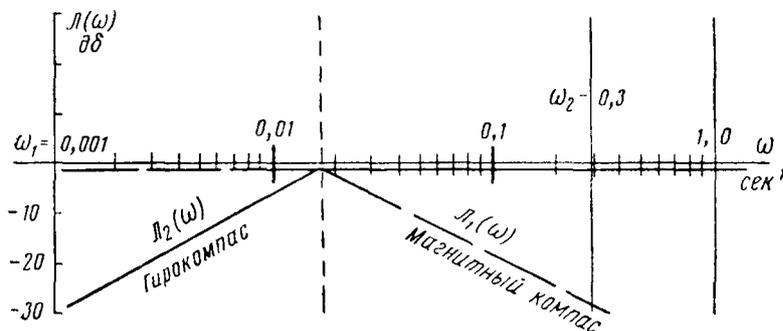


Рис. 110

Величина постоянной составляющей обратно пропорциональна частоте сопряжения фильтров, т. е.

$$T = \frac{1}{\omega}.$$

Частота сопряжения ω должна находиться посередине между частотами ω_1 и ω_2 .

Принимая

$$\omega_1 = 0,3 \text{ сек}^{-1}, \text{ (магнитный компас),}$$

$$\omega_2 = 0,001 \text{ сек}^{-1} \text{ (гироскомпас)}$$

при помощи совмещенного графика (см. рис. 110) получаем

$$\omega \approx 0,018 \text{ сек}^{-1}, T = \frac{1}{\omega} \approx 55 \text{ сек.}$$

Рассмотренный принцип комплексирования двух датчиков положен в основу работы всех гироманитных компасов, которые, сохраняя общую поправку магнитного компаса (склонение и девиация), имеют большую динамическую устойчивость благодаря гироскопу, являющемуся составной частью прибора.

Магнитный компас как автономный датчик является одним из основных элементов комплексных систем курсоуказания на морском флоте.

2600 г. до н. э. — Первые сведения об использовании человеком магнитной стрелки для ориентировки на местности¹.

250 г. н. э. — Считают, что к этому времени магнитный компас был впервые применен на море. Однако мнения историков в отношении времени и места этого события разноречивы.

1269 г. — Вышло в свет «Послание о магнитах» Петра Перегрина, где дается наиболее древнее неопровержимое описание компаса с азимутальным лимбом, разделенным на 90° по четвертям и снабженным подвижным визиром для пеленгования. Компасная стрелка укреплена на вертикальной оси, вместе с которой вращается по горизонту.

1302 г. — Итальянец Флавио Жиоия внес дальнейшее усовершенствование в компас. Он укрепил на компасной стрелке картушку, разделенную на 32 румба, а стрелку поместил на острие шпильки.

1492 г. — Христофор Колумб открыл магнитное склонение, хотя, по утверждению некоторых историков, оно было известно еще в VIII—XI вв.

1576 г. — Английский мореплаватель и инструментальный мастер Роберт Норман открыл магнитное наклонение.

1600 г. — Опубликовано первое систематическое исследование явлений магнетизма. Автор книги «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле» — английский ученый Уильям Гильберт.

1759 г. — М. В. Ломоносов выступил со своим трудом «Рассуждение о большой точности морского пути», где высказал ряд ценнейших мыслей о магнетизме, в частности мысль о создании самопишущего компаса — прототипа нынешнего курсографа.

1785 г. — Открытие закона Кулона. Первая попытка количественного определения величин магнитных сил.

1801 г. — Английский капитан Флиндерс наблюдал изменение девиации компаса с изменением широты района плавания.

1815 г. — Первые определения девиации магнитных компасов в русском флоте, произведенные штурманом Халезовым. Позже (1824 г.) подобные определения произвел выдающийся русский мореплаватель И. Ф. Крузенштерн на бриге «Олимп».

1824 г. — Французский ученый Пуассон опубликовал уравнения магнитного поля однородно намагниченного тела, которые легли в основу теории девиации магнитного компаса.

1835 г. — Издан труд русского ученого И. М. Симонова «Опыт математической теории земного магнетизма», в котором предприняты первые шаги по

¹ Н. В е н с к е р — «Historical and Bibliographie Index concerning the development and improvement of the Compass. «The Hydr. Review, No. 1, May, 1941.

установлению аналитической связи между координатами точек на земной поверхности и элементами магнитного поля Земли.

1838 г. — Впервые был применен способ Эри уничтожения полукруговой девиации.

1839 г. — Появились работы Гаусса: «Напряженность земной магнитной силы» и вскоре — «Общая теория земного магнетизма», которые являются основой современного учения о магнитном поле Земли.

1861 г. — Оборудованы кронштадтские девиационные створы, передние знаки которых были нанесены на стенке гавани, а в качестве заднего знака использовали трубу судоремонтного завода в Кронштадте. Создателем этих створов является первый в России ученый-девиатор И. П. Белавенец.

1862 г. — Вышло в свет «Руководство для определения девиации компасов» А. Смита и Ф. Эванса, где впервые излагается обстоятельная теория девиации магнитного компаса.

1864 г. — Создание в Кронштадте морской компасной обсерватории. Инициатором создания обсерватории и ее начальником был И. П. Белавенец.

1865 г. — Вышло в свет первое в России руководство «О девиации компасов и о дигораммах», написанное И. П. Белавенцем. Впоследствии им же было написано шесть дополнений к этому руководству. В результате был создан капитальный труд по теории и практике девиации.

1875 г. — И. П. Колонг приступил к работе над созданием дефлектора взамен существовавшего тогда менее удобного дефлектора Сэбайна. В процессе работы он обосновал теорию уничтожения полукруговой девиации на четырех главных компасных курсах и сам произвел это уничтожение. Результаты этих исследований он начал публиковать с 1877 г.

Колонгом же были разработаны и другие применяемые ныне способы уничтожения девиации, в частности уничтожение полукруговой девиации на магнитных курсах Е — W и уничтожение креновой девиации в прямом положении судна с помощью дефлектора.

1886 г. — Опубликован труд А. Н. Крылова «О расположении стрелок в картушке компаса», где дается решение вопроса об уничтожении девиаций высших порядков. Идеи, изложенные в этом труде, явились теоретической основой современного морского магнитного компаса.

1895 г. — Вышло «Руководство по девиации компаса» Ф. Ф. Ридигера и Н. Н. Оглоблинского. Этот труд является классическим по широте материала и глубине излагаемых в нем вопросов.

1914 г. — Крупнейший специалист по магнитным компасам В. Я. Павлинов разработал и испытал бесстрелочный магнитный компас, действующий на принципе индукции. Этот принцип с успехом используется в некоторых типах современных дистанционных компасов.

1918 г. — Первое руководство по девиации, выпущенное в советское время, — «Магнитный компас на корабле» В. Я. Павлинова.

1921 г. — Советский ученый П. А. Домогаров, развивая идеи своих предшественников, решил в общем виде задачу о рациональном расположении стрелок в картушке компаса. Результаты исследования опубликованы им под названием «Теоретическая девиация».

1927 г. — Вышел учебник «Девиация магнитного компаса» Б. П. Хлюстина. Этот учебник, особенно последние его издания, сыграл большую роль в подготовке специалистов магнитно-компасного дела для советского морского флота.

1938 г. — Академик А. Н. Крылов произвел исследования по динамическому расчету картушки компаса, опубликованные им в труде «Возмущение показаний компаса, происходящее от качки корабля на волнении». В этом труде ученый высказал мысль о создании новой картушки сферической формы, которая должна быть более устойчивой во время качки.

1945 г. — «Дегауссинг и девиация компасов» И. Н. Терехова — первое издание на русском языке систематизированное руководство по электромагнитной девиации на современных судах.

1952 г. — Вышло в свет руководство «Магнитно-компасное дело» известного советского ученого-девиатора Н. Ю. Рыбалтовского, где наиболее полно излагаются современные вопросы теории и практики морского магнитного компаса.

1953 г. — Опубликован труд выдающегося советского магнитолога профессора Б. М. Яновского «Земной магнетизм» (переработанное и дополненное издание 1941 г.).

Этот труд является монографией по земному магнетизму. В нем также нашли отражение вопросы девиации магнитного компаса.

1953 г. — Вышел в свет второй том «Морского атласа», изданный в Советском Союзе. В нем даны уточненные мировые карты элементов земного магнетизма для эпохи 1950 г.

1956 г. — Начало планомерной магнитной съемки Мирового океана, проводимой советскими учеными на маломанитной шхуне «Заря».

1957 г. — В Советском Союзе произведен запуск первого в мире искусственного спутника Земли, открывший новую эру в изучении космоса, в том числе в изучении его магнитных полей.

1959 г. — Вышла в свет книга «Магнитные компасы» — т. V «Курса кораблевождения», издаваемого Гидрографической службой ВМФ. Авторы И. Н. Терехов и Н. И. Вешняков.

ЛИТЕРАТУРА

Григорьев В. В. [и др.]. Мореходные приборы и инструменты. М., «Морской транспорт», 1970.

Рыбалтовский Н. Ю. Магнитно-компасное дело. М., Водтрансиздат, 1954.

Терехов И. Н., Вешняков Н. И. Магнитные компасы. Курс кораблевождения. Том. V. Кн. 2-я. Управление ГС ВМФ, 1959.
