

III. СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ

УДК 681.3:527(075.8)

ГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАЦИИ

А.А. Барабаш, Дальрыбвтуз, Владивосток

В статье приводится описание методики реализации графоаналитического метода астрономической обсервации по данным наблюдений нескольких светил в электронной таблице MS Excel. Аналитическая обработка исходных данных ведётся в модулях VBA Project, а графические построения и результаты вычислений отображаются на листе электронной таблицы. Статья полезна для подготовки судоводителей по программе дисциплины «Мореходная астрономия».

В основу графоаналитического метода обработки астронавигационных наблюдений положен метод высотных линий положения (ВЛП), когда элементы линии – переносы n и азимуты A – вычисляются аналитически, а прокладка линий выполняется графическим путём на бланке или навигационной карте. Для получения обсервованного места требуются данные наблюдений от двух до пяти светил, на основании которых получают линейные уравнения ВЛП:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi \cos A_1 + \Delta w \sin A_1 &= n_1; \\ \Delta\varphi \cos A_n + \Delta w \sin A_n &= n_n \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – приращение широты относительно счислимого места; Δw – отстояние или $\Delta w / \cos \varphi = \Delta\lambda$ – приращение долготы; A – азимут светила; n – перенос, $n = h_o - h_c$ – разность между обсервованной и счислимой высотами светила.

Поскольку в любых измерениях присутствуют случайные погрешности, то для их уравнивания при решении системы уравнений (1) применяют метод наименьших квадратов (МНК): его графический или аналитический варианты. При аналитическом решении систему уравнений из нескольких ВЛП приводят к нормальному виду из двух линейных уравнений (2):

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi \sum \cos^2 A + \Delta w \sum \cos A \sin A &= \sum n \cos A; \\ \Delta\varphi \sum \cos A \sin A + \Delta w \sum \sin^2 A &= \sum n \sin A \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

и решая эту систему обычным путём, получают вероятнейшие значения приращений координат $\Delta\varphi$ и Δw (3)

$$\left. \begin{aligned} \Delta w &= \frac{\sum \cos^2 A \sum n \sin A - \sum \sin A \cos A \sum n \cos A}{\sum \cos^2 A \sum \sin^2 A - \sum (\sin A \cos A)^2}; \\ \Delta\varphi &= \frac{\sum \cos^2 A \sum n \cos A - \sum \sin A \cos A \sum n \sin A}{\sum \cos^2 A \sum \sin^2 A - \sum (\sin A \cos A)^2} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

а далее сами искомые координаты φ_0 и λ_0 (4):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 &= \varphi_c + \Delta\varphi; \\ \lambda_0 &= \lambda_c + \Delta w / \cos\varphi \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Аналитический вариант МНК в виде системы формул (3) удобен для машинного решения, но страдает полным отсутствием наглядности, столь необходимой в учебной практике. Более приемлемым вариантом в этом случае может служить центрографический приём отыскания координат вероятнейшего места, когда уравниваются не сами линии положения, а координаты точек попарного пересечения линий в фигуре погрешностей.

Реализация центрографического приёма выполняется в три этапа:

1. Каждой точке пересечения двух линий положения приписывается вес P_{ij} :

$$P_{ij} = k \sin^2(A_i - A_j) = k \sin^2(\Delta A_{ij}), \quad (5)$$

где $k = p_i p_j$ – произведение весов линий положения; при равноточных наблюдениях можно принять $k = 1$.

2. Вычисляются координаты всех точек пересечения линий положения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi_{ij} &= \frac{n_i \sin A_j - n_j \sin A_i}{\sin \Delta A_{ij}}; \\ \Delta w_{ij} &= \frac{n_j \cos A_i - n_i \cos A_j}{\sin \Delta A_{ij}} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

количество точек N пересечения зависит от количества линий положения n и определяется из выражения: $N = n(n-1)/2$.

3. Рассчитываются вероятнейшие значения приращения координат $\Delta\varphi_0$ и Δw_0 :

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi_0 &= \sum P_{ij} \Delta\varphi_{ij} / \sum P_{ij}; \\ \Delta w_0 &= \sum P_{ij} \Delta w_{ij} / \sum P_{ij} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Вероятнейшие значения приращений координат добавляются к счислимым координатам так же, как и в формуле (4), и получают искомыми obserвованные координаты. Оценка точности obserвации в этом случае производится удвоенным значением радиальной погрешности, величину которой можно рассчитать по формуле

$$m = \pm 2 \cdot \sqrt{\sum p_i / \sum P_{ij}}. \quad (8)$$

Приведённая здесь методика получения координат obserвованного места по формулам (5-8) использована нами для моделирования графической прокладки линий положения на рабочем листе электронной таблицы MS Excel. Аналитические расчёты при этом выполняются в модуле VBA Project, а конечные результаты обработки данных и «рисунок» obserвации отображаются на рабочем листе MS Excel. Программа вычислений в модуле содержит три процедуры: Sub Рисунок(); Sub Место_МНК() и Sub Рис_Чистить(). Для обеспечения возможности обмена данными между процедурами вначале объявляются массивы переменных типа Global.

Процедура Sub Рисунок() обеспечивает управление всем процессом моделирования obserвации по командам пользователя, реализуемых с помощью двух элементов управления – экранные кнопки «Рисунок» и «Стереть». Активизация первой кнопки обеспечивает вывод на экран графической модели obserвации, один из примеров которой показан на рисунках 1, 2.

	A	B	C	D
1	Азимуты	231,7°	179,7°	151°
2	Переносы	1,1'	1,3'	2,7'
3				
4	$\Delta\varphi =$		2' k S	
5	$\Delta\lambda =$		0,6' k E	
6	$\varphi_0 =$	41°	59,1' N	
7	$\lambda_0 =$	132°	6' E	
8	2M ₀ =	±1,8'		
9				
10	Рисунок			
11	Стереть			
12				
13				

Рис. 1. Данные для построения высотных линий положения (азимуты, переносы), координаты места (φ_0 , λ_0) и оценка точности obserвации (удвоенное значение радиальной погрешности – 2M₀)

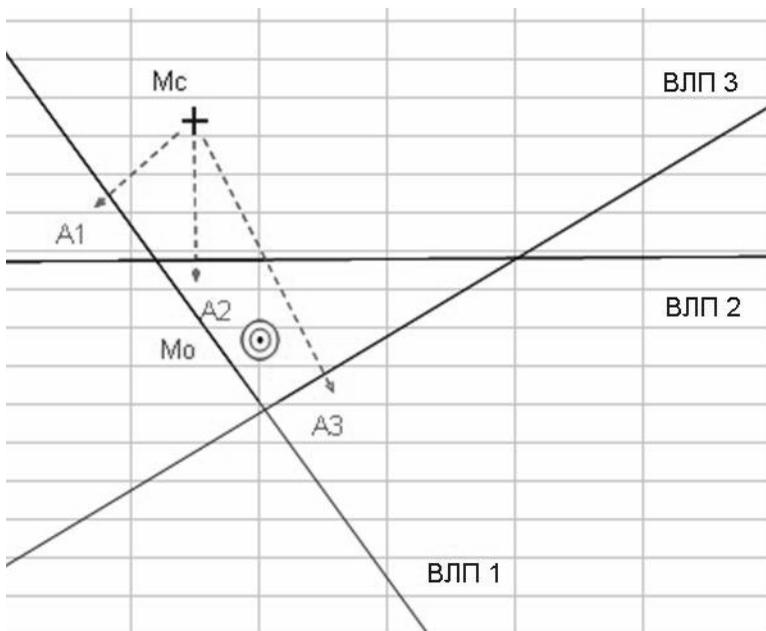


Рис. 2. Пример прокладки линий положений на листе электронной таблицы:
 M_c – числимое место; M_o – наблюдаемое место; A_i – азимуты;
 ВЛП1,2,3 – высотные линии положения

Итоги наблюдения, показанные на рис. 1, формируются в соответствии с результатами прокладки ВЛП (см. рис. 2) и их обработки по формулам (5-7). Для упрощения обработки чисел, заданных в градусной и часовой мере, их ввод и вывод производится в несколько ячеек электронной таблицы, например, значение широты места $\varphi_o = 41^\circ 59,1'N$ записывается в ячейки B6 – 41°, C6 – 59,1' и D6 – N. Для вычислительной обработки подобная запись преобразовывается в десятичное число со знаком. Знак определяется по наименованию (N – "+" и S – "-") и присваивается числу – в нашем примере: $41 + 59,1/60 = 41,985$.

В процедуре `Sub Рисунок()` после объявления внутренних переменных и массивов встроено блок защиты от повторного наложения рисунков друг на друга, когда пользователь, не удалив прежние построения, повторно щёлкает по кнопке «Рисунок». В этом случае производится проверка контрольной ячейки, а с помощью функции `MgBox()` выводится сообщение, предлагающее ему удалить прежний рисунок, щёлкнув по кнопке «Стереть». Программный код, фрагмент которого показан ниже, включает управляющую структуру, `If` условие `Then` переход, обеспечивающую проверку содержимого ячейки `F1` и пере-

дачу управления следующей строке кода или переход на метку metka0 в зависимости от содержания ячейки.

```
Range("F1").Select
If ActiveCell.FormulaR1C1 <> "" Then GoTo metka0
.....
metka0:
MsgBox ("Сотрите прежний рисунок, щёлкнув по кнопке
Стереть"), , "Предупреждение"
Exit Sub
```

Проверка правильности заданных пользователем исходных параметров обсервации ведётся на начальном этапе. Неверно заданные параметры лишь комментируются программой и не сопровождаются принудительным запретом на дальнейшую работу.

За начало графических построений выбрано постоянное место в координатах x_0 , y_0 , численно равных центру ячейки H12 (приблизительно середина экрана при его масштабе 100 %). На рис. 2 это место обозначено символом Mc. Для построения линий использован метод AddLine с установкой набора необходимых свойств, например:

```
ActiveSheet.Lines.Add(xo, yo - 5, xo, yo + 5).Select
With Selection.Border
.LineStyle = xlContinuous
.ColorIndex = 5
.Weight = xlMedium
End With
```

Для вывода форматированных текстов в заданные ячейки таблицы использовался метод Range, например, в следующем примере в середине ячейки H11 выводится текст «Mc» синего цвета:

```
Range("H11").Select
Selection.Font.ColorIndex = 5
ActiveCell.FormulaR1C1 = " Mc"
```

Поскольку тип шрифта и его размер явно не заданы, то параметры шрифта устанавливаются по умолчанию: «Arial Cyr, 10».

Масштаб рисунка. При прокладке ВЛП на бумаге пользователь выбирает масштаб для графических построений, руководствуясь двумя соображениями: рисунок должен полностью разместиться на листе и быть как можно крупнее. То же реализовано и в программном коде: с помощью цикла For - Next вычисляется среднеарифметическое значение из всех переносов и присваивается переменной Crpr; а с помощью цикла Do While - Loop подбирается рациональный коэффициент K для вывода графики.

```
For i = 1 To N
Spr = Spr + Abs(npr(i))
Next
Crpr = (Spr / N) * K
Do While Crpr > 100
K = K - 2
Crpr = (Spr / N) * K
Loop
```

*Линии азимутов*¹ (на рис. 2 – пунктирные линии-стрелки, обозначенные символами *A_i*). Экранные координаты линий азимутов (начало – $x_0 + dx$, $y_0 - dy$; конец – $x(i) + dx$, $y(i) - dy$) рассчитываются в структуре цикла For – Next.

```

For i = 1 To N
  Az = Ac(i)
  If npr(i) < 0 Then Az = Az + 180
  If Az > 360 Then Az = Az - 360
  yg = Az * pr
  dx = R * Sin(yg) * 0.93: dy = R * Cos(yg)
  x(i) = x0 + K * Abs(npr(i)) * Sin(yg) * 0.93
  y(i) = y0 - K * Abs(npr(i)) * Cos(yg)
  ' стрелки азимутов
  ActiveSheet.Lines.Add(x0 + dx, y0 - dy, x(i) + dx,
y(i) - dy).Select
.....
Next

```

Направление рисования определяется проверкой знака переноса $npr(i)$ в структурах принятия решений If Then: при отрицательном переносе стрелка азимута выводится в противоположную сторону $Az = Az + 180$. Координаты конечных точек линий азимутов $x(i)$ и $y(i)$ вычисляются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= x_0 + K \cdot \text{Abs}(npr_i) \cdot \sin(yg) \cdot 0,93 \\ y_i &= y_0 - K \cdot \text{Abs}(npr_i) \cdot \cos(yg) \end{aligned} \right\}$$

с учётом экранных искажений (коэффициент 0,93).

Для вывода линий на экран использован метод Lines.Add (начало, конец).Select, позволяющий форматирование графического объекта в структуре With Selection. ... End With.

Название азимутов. Стрелки азимутов на рис. 2 обозначены символами *A_i*, вывод которых происходит в адресные ячейки электронной таблицы. Вычисление координат ячеек (Row – строка, Col – колонка) выполняется пересчётом экранных координат в координаты ячеек с накоплением их названий в массиве N*Az*(i) и последующим форматированием размера Font.Size и цвета Font.ColorIndex индексов:

```

' имена азимутов
Row = Int((y(i) - dy) / 13): Col = Int((x(i) + dx) / 42)
NAr(i) = Row: NAc(i) = Col
Cells(Row, Col).Value = NAr(i)
Cells(Row, Col).Select
Selection.Font.Size = 10
Selection.Font.ColorIndex = 14

```

¹ Для рисования линий может использоваться метод AddLine: Shapes.AddLine(10, 10, 250, 250).Line.

Линии положения (на рис. 2 – ВЛП1,2,3). Координаты линий положения в отличие от линий азимутов вычисляются относительно координат определяющей точки на линии азимута ($x(i)$, $y(i)$) в два этапа: вначале вычисляются координаты начала линии $x1$, $y1$ и корректируются, если их значения выходят за границы экрана; затем вычисляются координаты конца линии $x2$, $y2$ и вновь корректируются, если их значения выходят за границы зоны рисунка. Для проверки этих условий использованы блочные структуры `If Then End If` и операторы принудительного перехода `GoTo` Метка:

```
'линии положения
L1 = 1: L2 = 1
1:
dlx = L1 * Cos(yg) * 0.93: dly = L1 * Sin(yg)
x1 = x(i) - dlx: y1 = y(i) - dly
If x1 < 1 Or y1 < 1 Then
L1 = L1 - 5
GoTo 1
End If
2:
dlx = L2 * Cos(yg) * 0.93: dly = L2 * Sin(yg)
x2 = x(i) + dlx: y2 = y(i) + dly
If x2 < 1 Or y2 < 1 Then
L2 = L2 - 5
GoTo 2
End If
```

Сама линия положения на основании вычисленных координат начала – $x1$, $y1$ и конца – $x2$, $y2$ выводится на экран с форматированием прежним методом:

```
ActiveSheet.Lines.Add(x1, y1, x2, y2).Select
With Selection.Border
.LineStyle = xlContinuous
.ColorIndex = 11
.Weight = xlThin
End With
```

Названия линий положения (на рис. 2 – ВЛП1,2,3). Адреса ячеек `Cells(Row, Col)`, в которые выводятся названия линий положения, вычисляются относительно начальных координат линий ($x1$, $y1$) и затем корректируются, если выходят за границы заданной области рисования:

```
Row = Int(y1 * 0.088): Col = Int(x1 * 0.02)
If Row < 1 Then Row = 1 'корректировка адресов
If Col < 1 Then Col = 1 'по строкам и колонкам
If Row > 20 Then Row = 20
If Col > 17 Then Col = 17
Ncr(i) = Row: Ncc(i) = Col
Cells(Row, Col).Value = NL(i) 'имена линий положения
```

```
Cells(Row, Col).Select      'форматирование текста
Selection.Font.Size = 10
Selection.Font.ColorIndex = 11
```

Отыскание обсервованного места (Мо на рис. 2). Координаты обсервованного места вычисляются в процедуре Sub Место_МНК() по методу наименьших квадратов (5-8).

В этой процедуре вначале резервируются локальные массивы (двухмерные и одномерные) координат вершин фигуры погрешностей и их весов:

```
Dim df(1 To 10), dw(1 To 10) As Single
Dim P(1 To 10)
Dim Sp, Sdf, Sdw, srA, Ar(1 To 10),
```

а затем выполняется заполнение этих массивов с помощью процедуры из двух вложенных циклов:

```
For i = 1 To N - 1
For j = i + 1 To N
srA = Sin(Ar(j) - Ar(i))
P(Ct) = srA ^ 2
'разность широт вершины
df(Ct) = (npr(i) * Sin(Ar(j)) - npr(j) * Sin(Ar(i))) / srA
'отшествоие вершины
dw(Ct) = (npr(j) * Cos(Ar(i)) - npr(i) * Cos(Ar(j))) / srA
Ct = Ct + 1 ' счётчик
Next
Next
```

Средневзвешенные координаты ($\Delta\varphi = Sdf$ и $\Delta w = Sdw$) искомого места вычисляются для координат на равносторонней плоскости в цикле из $N = n(n - 1) / 2$ повторений:

```
For i = 1 To Int(N * (N - 1) / 2)
Sp = Sp + P(i)
Sdf = Sdf + P(i) * df(i) 'разность широт места
Sdw = Sdw + P(i) * dw(i) 'отшествоие места
Next
```

Полученные в процедуре Sub Место_МНК() средневзвешенные приращения координат возвращаются в процедуру Sub Рисунок(), на их основе рассчитываются экранные координаты обсервованного места:

```
dx = wd * K * 0.93: dy = -fd * K
CenterX = xo + dx: CenterY = yo + dy 'координаты гра-
фического места
```

Относительно точки в координатах CenterX, CenterY на экране рисуется символ астрономической обсервации из трёх вложенных окружностей разных радиусов. Для этого использован метод Ovals.Add(X, Y, Rx, Ry)².

² В VBA 6.3 и выше использован более унифицированный метод Shapes.AddShape(msoShapeOval, x, y, Rx, Ry).Select.

```

ActiveSheet.Ovals.Add(CenterX-7,CenterY-
7,15,4).Select
ActiveSheet.Ovals.Add(CenterX-4,CenterY-4,9,8).Select
ActiveSheet.Ovals.Add(CenterX-1,CenterY-1,3,2).Select
Символ обсервованного места Mo заносится в ячейку электронной
таблицы, параметры которой вычисляются пересчётом координат точек
в номера строки  $Ncr(N + 1)$  и столбца  $Ncc(N + 1)$ :
Ncr(N + 1) = Int(CenterY / 14) + 1
Ncc(N + 1) = Int(CenterX / 45)
Cells(Ncr(N + 1), Ncc(N + 1)).Value = " Mo"

```

Результаты обсервации. Числовые параметры обсервованного места (приращение координат $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ и сами координаты φ и λ), показанные на рис. 1, формируются на основании анализа наименований (N или S; E или W) самих координат и их приращений. При совпадении их наименований выполняется сложение, а при несовпадении – вычитание:

```

Namef = " N" \ наименование
координат
If FoGr < 0 Then Namef = " S"
Name1 = " E"
If LoGr < 0 Then Name1 = " W"
Namedf = "k N" \ наименование
приращений
If fd < 0 Then Namedf = "k S"
Named1 = "k E"
If ld < 0 Then Named1 = "k W"

```

Затем полученные символы заносятся в фиксированные ячейки электронной таблицы.

Стирание рисунка. Выполняется с помощью процедуры Sub Рис_Чистить(), которая запускается экранной кнопкой "Стереть". Очистка элементов графических построений организована в циклах по группам однородных объектов. Например, для удаления линий положения (графических объектов) использован цикл, содержащий строку поиска линии, ее выделения и стирания – метод Delete:

```

For i = 1 To N * 2 + 2
ActiveSheet.Lines(1).Select
Selection.Delete
Next

```

Необходимость удвоенного значения повторений в цикле ($N * 2 + 2$) вызвана тем обстоятельством, что каждая линия положения рассчитывалась и строилась в два приёма: влево и вправо относительно определяющей точки на линии азимута.

Для удаления текстовых объектов, например, названий азимутов, используется простой цикл, приводящий содержимое ячеек в состояние «пусто»:

```

For i = 1 To N
Cells(NAr(i), NAc(i)).Value = ""
Next

```

Для удаления названий линий положения использована система из двух вложенных циклов, также приводящая содержимое заполненных ячеек в состояние «пусто»:

```
For i = 2 To 7
  For j = 2 To 3
    Cells(i, j).Value = ""
  Next
Next
```

Библиографический список

1. *Красавцев Б.И.* Мореходная астрономия: Учеб. для вузов. М.: Транспорт, 1986. С. 255.
2. *Немцев О.В.* Приборы и методы астронавигации: Учеб. пособие. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2001. С. 165.

УДК 62-83(1-81):629.5

ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

А.Ф. Бурков, Дальрыбвтуз, Владивосток

В статье приведены сведения о некоторых этапах развития судовых электроприводов, об основных системах судовых электроприводов и перспективных направлениях их развития.

Развитие мирового судостроения и эксплуатации судов тесно связано с развитием судовой электроэнергетики. Электрическая энергия оказалась настолько удобным и универсальным видом энергии, что большая часть судового оборудования функционирует благодаря электроэнергии. Она относительно просто и с малыми потерями передается на расстояния и преобразовывается в другие виды энергии: механическую, световую, тепловую и пр. Электрическая энергия обладает свойствами внутреннего преобразования и делимости. Начало использования электрической энергии на судах относится ко второй половине XIX в. В 1880 г. электрическая энергия использовалась для освещения палуб и внутренних помещений. Опыт постройки и эксплуатации флота убедительно показывает актуальность использования электрической энергии на судах.

Несмотря на появление новых современных судовых механизмов, устройств и техническое перевооружение судов, электрическая энергия остается наиболее широко используемым видом энергии на судах. В судовой технике ведущее значение имеет автоматизация. Широко используется частичная автоматизация судов. Ставятся и решаются за-

дачи комплексной автоматизации судов. Чем более совершенны и технически оснащены современные суда, тем они, как правило, более электрифицированы. И в дальнейшем значение судовой электрической энергии будет только возрастать.

Основными потребителями судовой электрической энергии являются судовые электроприводы (ЭП), на долю которых приходится до 90 % электроэнергии, вырабатываемой общесудовыми генераторами. Около 30 % вырабатываемой электроэнергии приходится на долю судовых многоскоростных ЭП, несмотря на их небольшое количество на судах [6].

Электрификация судовых приводов началась в первой половине XIX в. Принято считать, что первым практически созданным ЭП был судовой. В 1838 г. Борис Семенович Якоби использовал систему «гальваническая батарея – двигатель постоянного тока» для привода гребных колес восьмивесельного катера. Катер по реке Нева против ветра и течения развил скорость около 1,5 уз. Впоследствии такие ЭП выделились в отдельное, динамично развивающееся в настоящее время направление – электродвижение судов. Таким образом, родиной судового ЭП является Россия, которая несмотря на общую техническую отсталость, но благодаря усилиям инженеров-технических работников занимала передовые позиции в области развития теории и практики судового ЭП. Во второй половине XIX в. преимущественно на отечественных военных кораблях внедряются ЭП вентиляторов, грузоподъемных устройств, рулевых установок. В 1886-1887 гг. на крейсерах «Адмирал Корнилов», «Лейтенант Ильин» и других начали применяться ЭП вентиляторов. В 1890-1894 гг. на эскадренном броненосце «Сисой Великий» был установлен ЭП грузоподъемного механизма для подъема боезарядов. В то же время, в 1892 г., на крейсерах «Георгий Победоносец», «Двенадцать апостолов» и других появились ЭП рулевых устройств. Начало XX в. отмечено широким использованием на кораблях ЭП постоянного тока: насосов, вентиляторов, рулевых установок, шпилей, брашпильей, грузоподъемных устройств. С 1908 г. стали применяться судовые ЭП переменного тока как наиболее надежные.

По условиям работы судовые ЭП можно объединить в следующие группы: длительного режима, кратковременного и повторно-кратковременного режимов. Первая группа включает в себя ЭП судовых механизмов с легкими условиями работы в переходных режимах вентиляторов, насосов и др. Приводы второй группы в большинстве случаев являются многоскоростными и, как правило, относятся к механизмам с тяжелыми условиями пуска, электрическими торможениями, необходимостью регулирования скорости и большой частотой включения: грузоподъемные, якорно-швартовные и пр. В процессе исторического развития наибольшее изменение претерпели ЭП второй группы.

Существует несколько различных систем ЭП с регулируемой скоростью: с электродвигателями (ЭД) постоянного тока, питающимися от сети; системы «генератор-двигатель» (Г-Д); «широотно-импульсный ре-

гулятор-двигатель» (ШИР-Д); «управляемый выпрямитель-двигатель» (УВ-Д); с многоскоростными асинхронными двигателями (АД), имеющими короткозамкнутый или фазный ротор; «непосредственный преобразователь частоты-асинхронный двигатель» (НПЧ-АД); «инверторный преобразователь частоты-асинхронный двигатель» (ИПЧ-АД) и др. Их сравнение по эксплуатационно-техническим показателям позволяет наиболее объективно определить область применения различных систем, прогнозировать вероятные направления развития данной группы судовых ЭП. Технико-экономическая оценка и область их применения даны в [8, 9].

Для судовых механизмов нашли применение многоскоростные ЭП с ЭД постоянного тока, питающимися от сети, а также от автономных электромашинных (система Г-Д) или статических (система ТП-Д) преобразователей, приводы с многоскоростными АД. Ведутся работы по внедрению ЭП со статическими преобразователями частоты.

Многоскоростные ЭП с двигателями постоянного тока, питающимися от сети, используются преимущественно на судах, построенных в 60-е годы и ранее, имеющих судовые электрические станции постоянного тока: серии судов типа т/х «Архангельск», 1953 г., Финляндия; т/х «Николай Островский», 1955 г., Бельгия; т/х «Тарту», 1960 г., ВНР; т/х «Симферополь», 1962 г., ПНР и др. Количество таких судовых ЭП постоянно уменьшается в связи с внедрением на подавляющем большинстве современных судов переменного тока, а также по причине списания судов, эксплуатируемых длительное время. Теория и варианты различных схемных решений приводов с ЭД постоянного тока, питающимися от сети, достаточно полно освещены и приведены в литературе [12].

Приводы системы Г-Д («Вард-Леонарда») нашли применение на судах более поздней постройки по отношению ко времени установки многоскоростных ЭП с двигателями постоянного тока, включаемыми непосредственно в сеть. К ним относятся брашпили – ряд судов серии типа т/х «Сибирьлес», СССР (т/х «Верхоянсклес», 1965 г.; т/х «Яна», 1966 г.); суда типа т/х «Новгород», 1967 г., Финляндия; АШЛ – серии судов типа т/х «Совфрахт», 1967 г., СФРЮ; т/х «Новгород»; грузовые лебедки – некоторые суда типа т/х «Беломорсклес», ПНР (т/х «Амурсклес», 1963 г.; т/х «Ангаралес», 1963 г.) и др.

В настоящее время обоснована неперспективность судовых ЭП системы Г-Д в силу ряда существенных недостатков, к которым в первую очередь относятся относительно невысокая надежность данной ответственной группы потребителей и повышенные эксплуатационные расходы из-за наличия машин постоянного тока; сравнительно высокие массо-размерные показатели. Только при мощности 70 кВт и выше масса электрооборудования многоскоростных ЭП системы Г-Д оказывается соизмеримой с массой электрооборудования приводов с двигателями постоянного тока, питающимися от сети, и релейно-контакторными системами управления [4]. Мощность же большинства устанавливаемых на судах многоскоростных ЭП менее 70 кВт. Кроме

того, необходимо отметить, что несмотря на возможность системы Г-Д обеспечить высокую плавность регулирования скорости, в судовых ЭП используется, как правило, не более пяти устойчивых скоростей во всем диапазоне регулирования. ЭП системы Г-Д также исчерпывающе рассмотрены в источниках [3, 4, 13].

Приводы, выполненные по системе ТП-Д, освещены в [1, 6, 10, 13] и в настоящее время составляют обоснованную конкуренцию судовым ЭП системы Г-Д по ряду технических характеристик [2, 9, 13]. Такие многоскоростные ЭП установлены на т/х «Волголес» – для механизма брашпиля, т/х «Северолес» – для грузовой лебедки, т/х «Алексей Косыгин» – для лихтерного крана. Однако их внедрение в судовой электро-технике весьма ограничено, так как не исключает полностью наличия машин постоянного тока. Область применения и технические характеристики судовых ЭП системы ТП-Д приведены в [2, 9].

В подавляющем большинстве судовых механизмов с регулируемой угловой скоростью установлены и эксплуатируются ЭП с многоскоростными АД. Это обусловлено, прежде всего, оснащением современных судов судовыми электроэнергетическими системами трехфазного переменного тока, рациональными решениями для ЭД в соотношениях чисел полюсов статорных обмоток, кратностей пусковых и максимальных моментов, маховых масс и пр.

Современные суда осуществляют рейсы в различных климатических зонах, условия эксплуатации судовых ЭП специфичны и резко отличаются от береговых. Приводы подвергаются климатическим (изменение температуры окружающей среды в широких пределах, повышенное содержание соли, высокая влажность) и механическим (вибрации и удары, изменение положения частей электрооборудования) воздействиям. Повышение требований к различным судовым ЭП приводит к необходимости поиска новых технических решений. На новый качественный уровень судовые ЭП вышли с развитием теоретических разработок и практическим внедрением полупроводниковой и микропроцессорной и другой техники.

Наиболее перспективным представляется развитие судовых ЭП по пути расширения областей использования асинхронных частотно-управляемых короткозамкнутых двигателей [1, 5, 11]. В настоящее время разработаны и осваиваются в промышленном производстве ЭП систем НПЧ-АД и ИПЧ-АД со статическими преобразователями частоты (с непосредственной связью и естественной коммутацией тока тиристоров серии ТТС и др.) [7].

Библиографический список

1. *Анисимов Я.Ф.* Судовая силовая полупроводниковая техника. Л.: Судостроение, 1979. 192 с.
2. *Васильев В.Н., Карауш Н.Я.* Эксплуатация судовых электроприводов: Справ. М.: Транспорт, 1985. 280 с.

3. Козак Г.И. Электротехника на торговых судах / Пер. с нем.; под ред. С.И. Антонова; Г.И. Козак, А. Вангерина. Л.: Изд-во судостр. пром., 1960. 551 с.
4. Михайлов В.А., Рукавишников С.Б., Фрейдзон И.Р. Электродвижение судов и электропривод судовых механизмов. Л.: Судостроение, 1965. 608 с.
5. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники. М.: Высш. шк., 1980. 424 с.
6. Сиверс П.Л. Судовые электроприводы. М.: Транспорт, 1975. 456 с.
7. Яуре А.Г. и др. Современное состояние и тенденция развития тиристорных электроприводов переменного тока для крановоподъемных механизмов: Аналит. обзор. М.: Информэлектро, 1981. 25 с.
8. Справочник судового электротехника: В 3 т. / Под ред. Г.И. Китаенко. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1980. Т. 1. 528 с.
9. Богословский А.П. Судовые электроприводы: Справ. В 2 т. Л.: Судостроение, 1983. Т. 1. 352 с.
10. Фрейдзон И.Р. Судовые автоматизированные электроприводы и системы. Л.: Судостроение, 1980. 440 с.
11. Хамудханов М.З., Хашимов А.А. Теория и методы расчета частотноуправляемых асинхронных электроприводов. Ташкент: ФАН, 1969. 231 с.
12. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. 6-е изд., доп. и перераб. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.
13. Яуре А.Г., Богословский А.П., Певзнер Е.М. Электроприводы судовых грузоподъемных механизмов. Л.: Судостроение, 1971. 184 с.

УДК 621.316

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КОНТАКТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ БЕЗДУГОВОЙ КОММУТАЦИИ

А.Ф. Бурков; Н.Д. Крицкий, Дальрыбвтуз, Владивосток

В статье рассматриваются особенности работы контактных коммутационных аппаратов в условиях бездуговой коммутации.

Многие электротехнические устройства, участвующие в производственных процессах, включают электрические аппараты (от лат. apparatus – прибор, приспособление, оборудование [1]). В России этот термин был распространен с 1879 г. [2] Павлом Николаевичем Яблочковым (1847-1894 гг.) [3] на электротехнические устройства того времени: коммутаторы, переключатели, реле, рубильники. В современном понимании электрическими аппаратами являются «... электротехнические устройства управления потоком энергии и информации ...» [2]. Широкое применение электрические аппараты получили для управле-

ния потоком электрической энергии. В частности, во многих системах управления электроприводов, в том числе и судовых механизмов, используются электрические аппараты – контактные коммутационные аппараты (электрохимические контакторы и реле).

К основным достоинствам контактных коммутационных аппаратов (контакторов) относятся большая перегрузочная способность по току нагрузки и управления; относительно невысокая стоимость (в пересчете на один канал управления); возможность одновременной коммутации нескольких независимых, гальванически не связанных электрических цепей с различными величинами напряжений и токов; низкое, относительно стабильное переходное сопротивление между замкнутыми контактами (по данным, приведенным в [4], менее 0,1 Ом); высокая глубина коммутации (отношение сопротивления коммутирующего органа в отключенном состоянии к его сопротивлению во включенном состоянии) [5].

Недостатками контактных коммутационных аппаратов в первую очередь являются процесс дугообразования в переходных режимах при больших коммутируемых токах и низкое быстродействие.

Анализ опыта эксплуатации судовых электроприводов с регулируемой угловой скоростью электродвигателей, в состав которых входят релейно-контакторные схемы управления, позволяет сделать вывод, что самым слабым звеном большинства таких систем являются магнитные контроллеры (магнитные станции). Наибольшее число отказов приходится на контактные системы контакторов по причине образования электрической дуги в переходных режимах при коммутациях электрических цепей [6]. Прочие отказы являются нетипичными, и, как правило, носят случайный характер. Кроме снижения безотказности, уменьшения межремонтных периодов и повышения затрат на обслуживание, дугообразование ограничивает диапазон или является причиной невозможности использования данных электротехнических устройств в условиях, несовместимых с возникновением электрической дуги, вызывает дополнительные потери электроэнергии.

Вопросам ликвидации или уменьшения электрической дуги контактных коммутационных аппаратов, прежде всего, контакторов, в настоящее время уделяется повышенное внимание. Можно выделить следующие основные направления, по которым ведутся работы:

- применение новых контактных материалов (металлокерамические композиции [7] и пр.);
- создание более эффективных способов гашения электрической дуги (в среде сжиженного элегаза SF_6 [8] и др.);
- разработка контактных смазок (отечественные – «Электросил», ВНИИ НП; типа 2G и 2GX английской фирмы «Electrolub» [9] и т.д.);
- усовершенствование приводных устройств (синхронные контакторы [10] и т.п.).

Первые три из перечисленных направления для контактного способа коммутации электрических цепей представляют собой полумеры,

так как противодействуют не причине, а следствию, и в большинстве случаев не обеспечивают бездуговую коммутацию, а только несколько повышают электрическую износостойкость, уменьшая электрическую дугу по величине и времени горения.

Одним из вариантов усовершенствования приводных устройств при контактном способе коммутации электрических цепей является синхронный контактор, в котором размыкание главных контактов в цепях переменного тока осуществляется без возникновения электрической дуги. Вместе с тем из-за сложности, относительно высокой стоимости и низкой надежности эти устройства не получили широкого распространения.

Развитие полупроводниковой техники привело к созданию бесконтактных коммутационных аппаратов (статических) на базе тиристорov, симисторов и пр. Использование полупроводниковых приборов в ключевом режиме (для включения и выключения электрических цепей) ликвидирует причины дугообразования, так как сопровождается размыканием цепей без механического разрыва, а, следовательно, без дуги. Кроме того, к основным достоинствам бесконтактных коммутационных аппаратов относятся высокая быстродействие, повышенный срок службы, относительно высокая простота обслуживания, способность работать в пожароопасных и взрывоопасных помещениях и пр.

Основными недостатками бесконтактных коммутационных аппаратов являются низкая перегрузочная способность по току нагрузки и управления; отсутствие возможности одновременной коммутации нескольких независимых, гальванически не связанных электрических цепей с различными величинами напряжений и токов; относительно высокое переходное сопротивление во включенном состоянии.

Стремление объединить основные достоинства контактных и бесконтактных коммутационных аппаратов привело к созданию гибридных устройств, основанных на принципе комбинированной коммутации, в которых контактные коммутационные аппараты, как правило, контакторы, работают в специальных режимах. При совместном использовании контактных и бесконтактных коммутационных аппаратов возможны два основных варианта взаимного включения главных контактов электромеханических аппаратов и полупроводниковых приборов – параллельное и последовательное.

В случае параллельного соединения ток во включенном состоянии устройства протекает через главные контакты электромеханических аппаратов, а в переходных режимах (при включении и выключении электрических цепей) функционируют бесконтактные коммутационные аппараты [11]. В большинстве технических решений при комбинированной параллельной коммутации практически не удается достичь бестокового расхождения контактов электромеханических аппаратов. Кроме того, для коммутации цепей необходимо такое же число полупроводниковых приборов, что и при бесконтактном способе.

При последовательном соединении главные контакты электромеханических аппаратов и силовые модули бесконтактных аппаратов

включаются последовательно, и во включенном состоянии аппаратов ток нагрузки протекает через главные контакты электромеханических аппаратов и силовые модули бесконтактных аппаратов [12].

В общем случае при комбинированной бездуговой коммутации электрических цепей возникает вопрос о целесообразности использования контакторов, рассчитанных для работы с образованием дуги. Альтернативным может быть проектирование контактных аппаратов для специальных (бездуговых) режимов работы при коммутациях электрических цепей или применение обычных однотипных электромеханических аппаратов меньшей величины с возможной корректировкой исходных данных.

Контакторы представляют собой относительно сложные электро-механические устройства, процессы в которых до настоящего времени не могут быть в достаточной степени описаны комплексом взаимосвязанных математических уравнений, позволяющих перейти к применению вычислительной техники для расчета и проектирования аппаратов в целом. При расчетах по эмпирическим формулам необходимо учитывать то, что они базируются на ограниченных экспериментальных данных и применимы с определенной степенью точности в пределах проведенных экспериментальных исследований.

Вопросы проектирования контакторов для контактного способа коммутации электрических цепей достаточно полно освещены в литературе [13, 14, 15]. Вследствие изменений условий эксплуатации при проектировании контактных коммутационных аппаратов для специальных режимов изменяются требования, предъявляемые к ним. Исключаются как составная часть дугогасительные устройства. Переносятся на бесконтактную составляющую вопросы, связанные с коммутациями электрических цепей. Отличен подход к расчету и проектированию других частей.

Разработка требований к контактной аппаратуре осуществляется на основании анализа их функционирования и сформулированных в государственных и отраслевых стандартах технических условиях, общих требований к контактным аппаратам.

К основным требованиям, предъявляемым к контактной аппаратуре, работающей в условиях бездуговой коммутации необходимо отнести следующие:

- функционально-технические: нагревостойкость частей аппаратов при допустимых режимах работы; электрическая прочность всех изоляционных частей при продолжительном максимальном рабочем напряжении и наихудших условиях окружающей среды; механическая прочность и износостойкость аппаратов в пределах допустимых режимов работы, срока службы; специфические требования, обусловленные работой аппаратов при бездуговой коммутации; возможная простота конструкции, малые массо-размерные показатели;

- эксплуатационные: учет влияния окружающих условий; надежность, безотказность; долговечность, необходимый срок службы; конструктивная простота; низкие эксплуатационные расходы;

- социальные: облегчение условий труда обслуживающего персонала (эргономические требования); безопасность в эксплуатации; эстетичность конструкции;

- экономические: низкая себестоимость; низкие капиталовложения при установке, монтаже и вводе в эксплуатацию;

- технологические требования;

- производственные требования.

Таким образом, проектирование электромеханических аппаратов (контакторов) для работы в специальных режимах представляет собой сложный процесс, требующий привлечения специалистов различных отраслей.

Наряду с проектированием в ряде случаев представляется целесообразным определение возможностей применения в специальных режимах (в условиях бездуговой коммутации) обычных однопольных контакторов меньшей величины, выпускаемых промышленностью. Для решения этой задачи необходима методика их расчета.

Проведенный анализ работ позволяет сделать вывод о недостаточности работ по данной тематике. Отдельные вопросы функционирования контакторов при комбинированной параллельной коммутации рассмотрены в [16]. В общем случае, кроме условий работы, при определении возможностей применения однопольных контакторов меньшей величины к исходным следует отнести нерегулируемые данные (форму, размеры и материал контактной системы, электромагнитного механизма и других конструктивных частей, коммутационную способность, род и величину напряжения и тока цепи управления, кинематическую схему) и регулируемые данные (раствор и провал контактов контактной системы, величину воздушного зазора магнитной системы).

Контакторы представляют собой однопозиционные аппараты и могут находиться в установившемся режиме (контакты замкнуты или разомкнуты) или переходном (процесс замыкания или размыкания контактов). Коммутирующие контакты являются основным звеном аппаратов. При работе контактов в условиях бездуговой коммутации определяющим становится их расчет в замкнутом состоянии.

Исходя из сказанного, можно выделить следующие основные этапы расчета контакторов:

- определение необходимых для нормальной работы контактных систем величин (расчет контактных систем);

- расчет электромагнитных механизмов и построение необходимых зависимостей;

- анализ полученных результатов с целью определения возможностей использования контактных аппаратов.

Библиографический список

1. Словарь иностранных слов / Под ред. *И.В. Лехина, Ф.Н. Петрова*. 5-е изд., М.: Гос. изд-во иностранных и национальных словарей, 1955. 856 с.
2. Электрические и электронные аппараты: Учеб. для вузов / Под ред. *Ю.К. Розанова*. М.: Энергоатомиздат, 1998. 752 с.
3. Люди русской науки: В 2 т. / Сост. и ред. *И.В. Кузнецов*; М.-Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1948. Т. 2. 1196 с.
4. *Коробков Ю.С., Флора В.Д.* Электромеханические аппараты автоматики. М.: Энергоатомиздат, 1991. 344 с.
5. *Таев И.С., Буль Б.К.* Основы теории электрических аппаратов / Под ред. *И.С. Таева, Б.К. Буль* и др. М.: Высш. шк., 1987. 352 с.
6. Повышение надежности электроприводов грузовых лебедок судов типа п/з «А. Захаров» путем их реконструкции при капитальном ремонте: Отчет о НИР (промежуточ.) / *Н.В. Сребнев, А.В. Исаков, Г.И. Чуев, А.Ф. Бурков* / МГУ им. адм. Г.И. Невельского. № ГР 01840058812. Инв. № 0285.0052996. Владивосток, 1985. 47 с.
7. *Александров Г.Н.* Теория электрических аппаратов / Под ред. *Г.Н. Александрова, В.В. Борисова*. М.: Высш. шк., 1985. 312 с.
8. *Александров Г.Н.* Проектирование электрических аппаратов / Под ред. *Г.Н. Александрова, В.В. Борисова*. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 448 с.
9. *Филимонов В.Д., Калязин Е.А., Головин Ю.Е.* Смазки для prolongation срока службы контактов в судовом электрооборудовании // Морской транспорт. Сер. «Техническая эксплуатация флота». М.: ЦБНТИ. 1981. Вып. 2 (506). С. 3-11.
10. *Таев И.С.* Электрические аппараты. Общая теория. М.: Энергия, 1977. 272 с.
11. *Могилевский Г.В.* Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1986. 233 с.
12. А. с. 1504678 СССР, МКИ³ Н 01 Н 9/30. Устройство для бездуговой коммутации цепей переменного тока / *Б.В. Осокин, А.Ф. Бурков, Н.В. Сребнев, А.В. Исаков, Г.И. Чуев*. Владивосток, 1989. № 32. 221 с.
13. *Залесский А.М., Кукеков Г.А.* Тепловые расчеты электрических аппаратов. Л.: Энергия, 1967. 380 с.
14. *Кузнецов Р.С.* Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В. М.: Энергия, 1970. 544 с.
15. *Сахаров П.В.* Проектирование электрических аппаратов. М.: Энергия, 1971. 560 с.
16. *Кукеков Г.А., Фролов В.Я.* Переходные процессы в контактно-тиристорных аппаратах. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 168 с.

УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИЙ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УПОРНОГО ВАЛА СУДОВОГО ВАЛОПРОВОДА

Л.К. Капран; В.В. Маницын; З.П. Старовойтова,
Дальрыбвтуз, Владивосток

Приводятся уравнения регрессий основных конструктивных характеристик упорного вала судового валопровода (длина вала, диаметр и толщина фланцев, диаметр отверстия под соединительный болт, диаметр по центру соединительных болтов, его масса) на основании исследования их зависимости от диаметра опорных шеек.

Упорный вал (рис. 1) расположен в середине упорно-опорного подшипника, который устанавливается в линию судового валопровода для восприятия осевой нагрузки от винта и передачи ее корпусу судна.

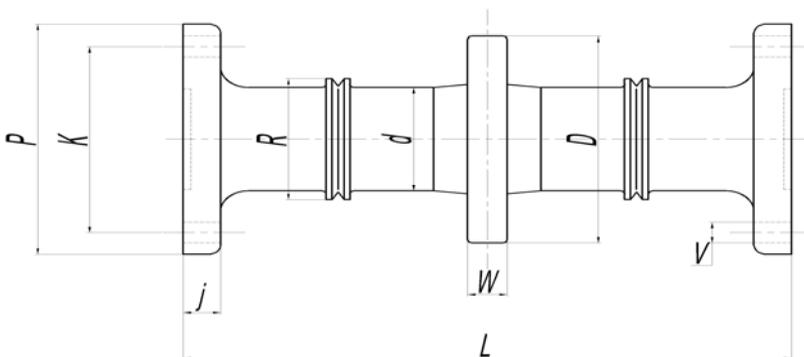


Рис. 1. Упорный вал судового валопровода: d – диаметр опорной шейки упорного вала; L – длина упорного вала; D – диаметр гребня; W – толщина упорного гребня; R – диаметр масляной канавки; p – наружный диаметр фланца; j – толщина фланца; k – диаметр по центру болтов; V – диаметр отверстия под соединительный болт

Упорный вал состоит из опорных шеек, упорного гребня, соединительных фланцев и масляных канавок. Для краткости в дальнейшем диаметр опорных шеек будем называть диаметром упорного вала; он зависит от крутящего момента двигателя (дизеля, газовой или паровой турбины) и должен быть $d_y \geq 1,1 d_n$, где d_n – диаметр промежуточного вала.

От диаметра упорного вала зависят его конструктивные характеристики (длина вала, диаметр и толщина упорного гребня, диаметр и толщина фланцев, диаметр отверстий под соединительные болты, диаметр по центру соединительных болтов, его масса и т.д.). Это позволяет предположить наличие связи между ними, так как с изменением диаметра упорного вала изменяются и его конструктивные характеристики, которые приведены в табл. 1.

Цель работы – найти форму связи между диаметром упорного вала и его конструктивными характеристиками для получения уравнения регрессии и этим упростить работу конструкторов и проектировщиков.

Таблица 1

Конструктивные эмпирические характеристики упорного вала, мм

d	L	D	W	ρ	j	k	V	Масса M , кг
110	600	235	35	240	30	170	25	71
125	650	260	40	320	35	185	32	114
140	650	300	45	360	40	205	32	152
160	700	330	45	380	45	230	38	200
180	800	360	55	400	50	260	44	273
200	850	400	70	420	50	290	50	347
220	950	430	85	450	55	330	50	462
250	1000	460	95	500	55	370	58	603
280	1000	520	100	550	60	400	68	780
300	1200	600	120	600	60	440	68	1075
350	1250	720	120	650	70	495	75	1515
400	1350	830	140	750	80	580	85	2210
450	1600	950	160	850	100	650	95	3210
500	1850	1050	180	950	120	730	95	4750
600	2150	1200	220	1200	160	900	105	8380

Типоразмерный ряд упорных валов (см. табл. 1) с диаметром от 110 до 600 мм (зарубежные данные) позволил получить расчетные формулы для его конструктивных характеристик: длины упорного вала L ; диаметра упорного гребня D ; толщины упорного гребня W ; диаметра отверстия под соединительные болты V ; наружного диаметра фланца ρ ; толщины фланца j ; диаметра по центру болтов k ; массы упорного вала M .

Рассмотрим зависимость длины упорного вала от его диаметра (рис. 2).

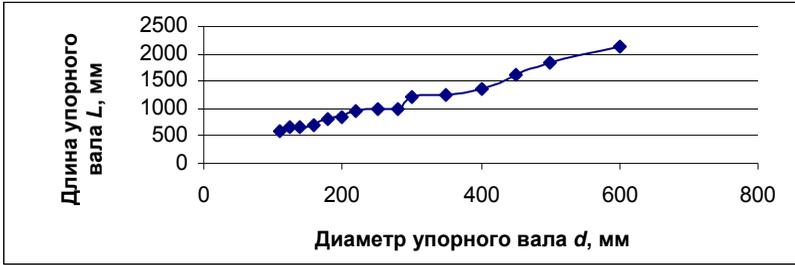


Рис. 2. Зависимость длины упорного вала от его диаметра по данным табл. 1

Эта зависимость может быть задана линейной функцией $L(d) = ad + b$, где параметры $a; b$ находятся по формулам [1]:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n d_i \cdot L_i - \sum_{i=1}^n d_i \cdot \sum_{i=1}^n L_i}{n \sum_{i=1}^n d_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n d_i \right)^2}; \quad b = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n L_i - a \cdot \sum_{i=1}^n d_i \right).$$

Уравнение зависимости L от d имеет вид $L = 3,114d + 221,26$. Геометрическая интерпретация эмпирических и теоретических значений подтверждает правильность выбора функциональной зависимости (рис. 3).

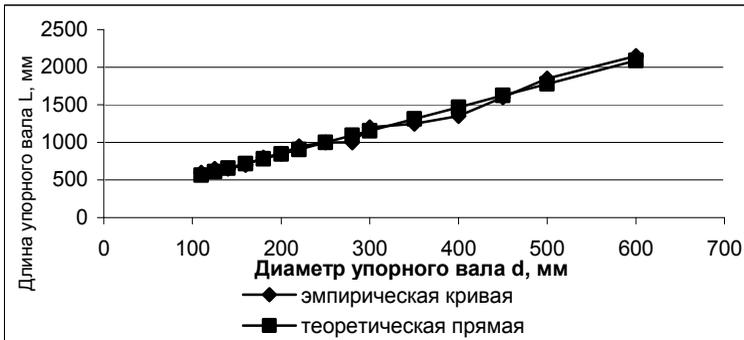


Рис. 3. Зависимость длины вала от диаметра упорного вала

Величина коэффициента корреляции $r_{dL} = 0,927$ показывает наличие сильной линейной зависимости длины вала от диаметра упорного вала. Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле

$$r_{dL} = \frac{k_{dL}}{\sigma_d \sigma_L}, \quad \text{где} \quad \bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i; \quad \bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i;$$

$$k_{dL} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})(L_i - \bar{L});$$

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}; \quad \sigma_L = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}.$$

Ошибка аппроксимации для каждого наблюдения определяется как

$$\left| \frac{L_i - \hat{L}_i}{L_i} \right| \cdot 100, \quad \hat{L}_i = 3,114d_i + 221,26.$$

Приведем таблицу значений длины вала L , найденной по полученной формуле, сравним с данными табл. 1 и посчитаем ошибку аппроксимации (табл. 2).

Таблица 2

d	L	$\hat{L} = 3,114d + 221,26$	$\left \frac{L - \hat{L}}{L} \right \cdot 100$
110	600	563,7954	6,0341
125	650	610,5052	6,0761
140	650	657,215	1,11
160	700	719,4946	2,7849
180	800	781,7743	2,2782
200	850	844,054	0,6995
220	950	906,3337	4,5965
250	1000	999,7532	0,0247
280	1000	1093,173	9,3173
300	1200	1155,452	3,7123
350	1250	1311,152	4,8921
400	1350	1466,851	8,6556
450	1600	1622,55	1,4094
500	1850	1778,249	3,8784
600	2150	2089,648	2,8071
		Σ	58,2762

Средняя ошибка аппроксимации находится как средняя арифметическая индивидуальных ошибок:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{L_i - \hat{L}_i}{L_i} \right| \cdot 100 = \frac{58,2762}{15} = 3,88 \%$$

Ошибка аппроксимации показывает хорошее соответствие расчетных и фактических данных: среднее отклонение составляет 3,88 %.

Аналогично для диаметра упорного гребня была получена линейная регрессия $D = 2,58d - 8,73$ (рис. 4). Коэффициент корреляции при этом равен $r_{dD} = 0,93$. Коэффициент детерминации составляет: $r_{dD}^2 = 0,93^2 = 0,8649$, т.е. вариация D на 86,49 % объясняется вариацией d . На долю прочих факторов, не учитываемых в регрессии, приходится 13,51 %. Среднее отклонение расчетных и фактических данных равно 3,87 %.

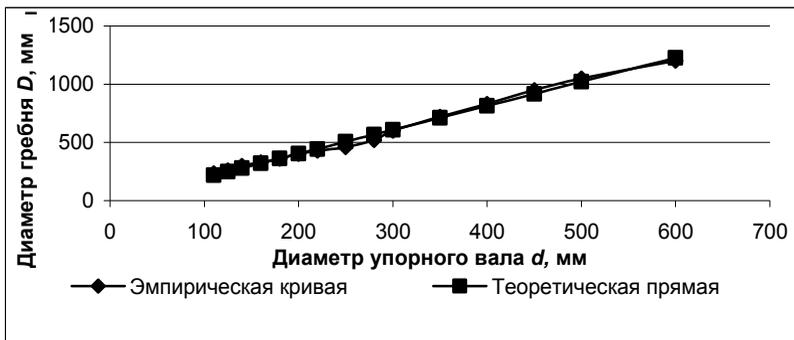


Рис. 4. Зависимость диаметра гребня от диаметра упорного вала

Уравнение зависимости толщины упорного гребня от диаметра упорного вала имеет вид $W = 0,376d - 6,193$ (рис. 5). Величина коэффициента корреляции $r_{dW} = 0,928$ показывает наличие сильной линейной зависимости толщины гребня от диаметра упорного вала. Ошибка приближения при этом составляет 5,26 %, что вполне допустимо.

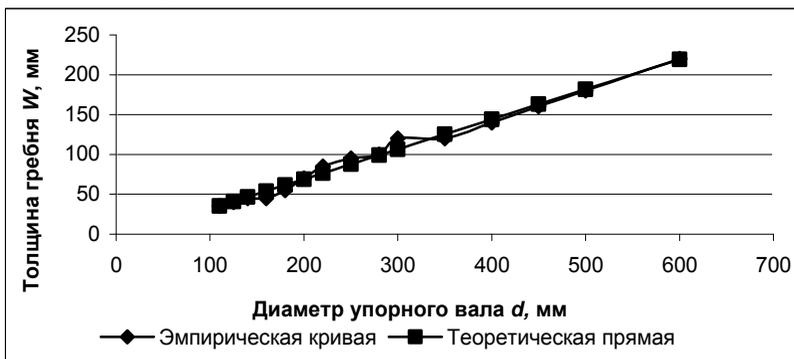


Рис. 5. Зависимость толщины гребня от диаметра упорного вала

Зависимость диаметра фланца от диаметра упорного вала имеет вид $p = 1,778d + 69,213$ (рис. 6). Коэффициент корреляции при этом $r_{dp} = 0,928$. Средняя ошибка приближения составляет 4,6 %.

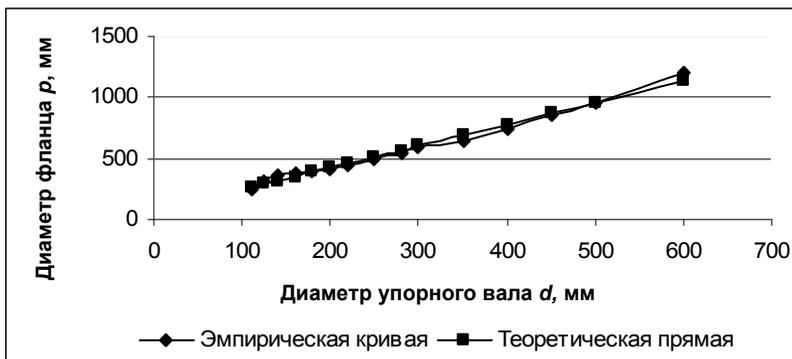


Рис. 6. Зависимость наружного диаметра фланца от диаметра упорного вала

Уравнение линейной зависимости толщины фланца от диаметра упорного вала имеет вид $j = 0,23d + 2,074$ (рис. 7).

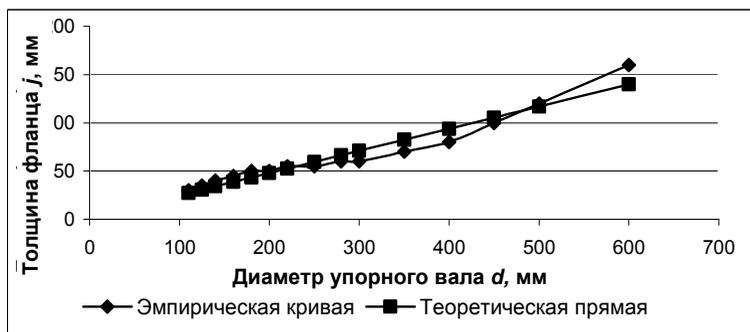


Рис. 7. Зависимость толщины фланца от диаметра упорного вала

Несмотря на то что коэффициент корреляции $r_{dj} = 0,902$ близок к единице, табличные значения толщины фланца отличаются значительно от ее значений, найденных по формуле $j = 0,23d + 2,074$. Средняя ошибка аппроксимации при этом равна 10,9 %.

Регрессия в виде квадратичной функции имеет вид

$$j = 0,0004d^2 - 0,0267d + 36,2675 .$$

Точки полученной параболы гораздо ближе расположены к точкам ломанной, изображающей значения толщины фланца, заданные табл. 1 (рис. 8). Средняя ошибка приближения при этом составляет 6,9 %.

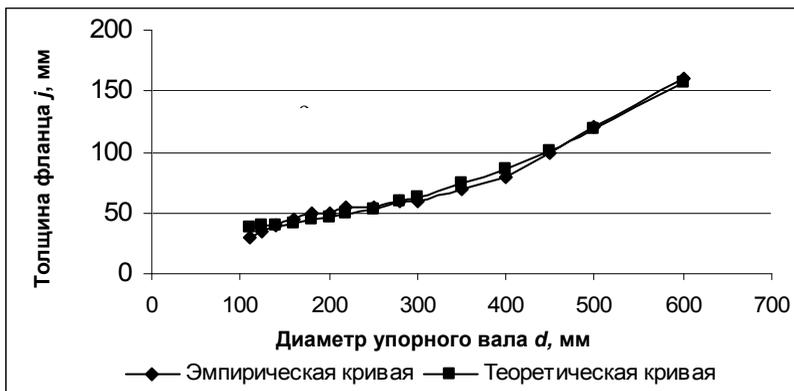


Рис. 8. Зависимость толщины фланца от диаметра упорного вала

Линейная зависимость k – диаметра по центру болтов – от диаметра упорного вала определяется уравнением $k = 1,47d - 2,257$ (рис. 9), коэффициент корреляции $r_{dp} = 0,93$, средняя ошибка приближения при этом равна 1,78 %, что говорит о хорошем подборе модели к исходным данным.

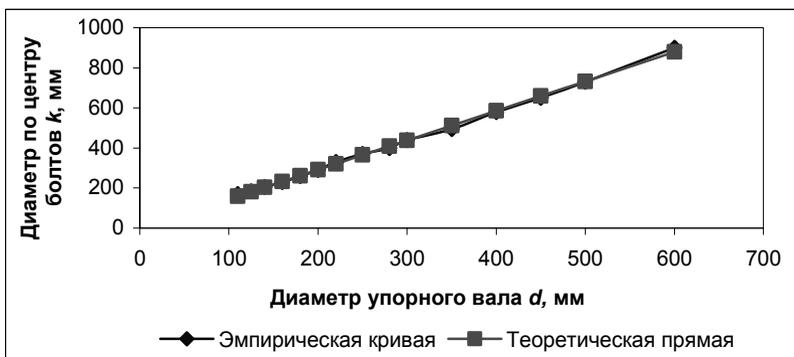


Рис. 9. Зависимость диаметра по центру болтов от диаметра упорного вала

Зависимость диаметра отверстия под соединительные болты от диаметра упорного вала имеет вид

$$V = -0,00022d^2 + 0,314d - 6,144 .$$

Средняя квадратическая ошибка приближения будет равна 1,86 мм, а средняя относительная ошибка аппроксимации составит 2,88 %, т.е. имеем хорошее соответствие расчетных и фактических данных (точки параболы находятся довольно близко к точкам ломаной линии (рис. 10)).

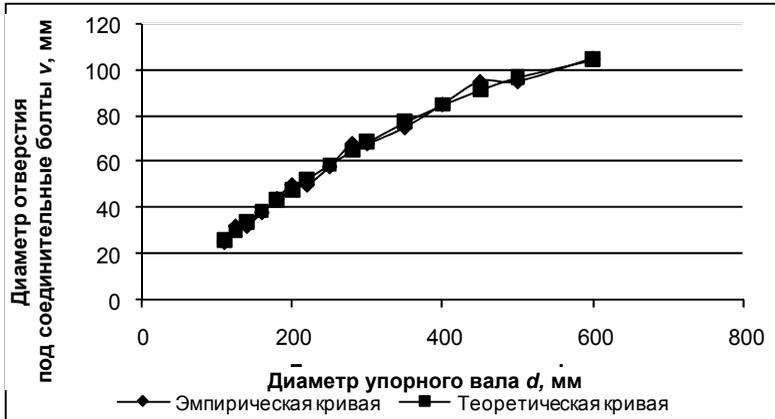


Рис. 10. Зависимость диаметра отверстия под соединительные болты от диаметра упорного вала

Рассмотрим зависимость массы упорного вала от размеров его диаметра. Если выбрать линейную регрессию $M = 14,28d - 2452,1$, то средняя квадратическая ошибка аппроксимации составит 54,2 %, для квадратичной зависимости $M = 0,043d^2 - 14,512d + 1391,04$ эта ошибка равна 10,9 %. Понятно, что от линейной зависимости нужно отказаться сразу. Что касается квадратичной зависимости, то имеет смысл интервал изменения переменной d разбить на два интервала и подобрать формулу для d , изменяющегося от 110 до 280 и от 300 до 600 отдельно.

Для $110 \leq d \leq 280$ получим формулу $M = 0,013d^2 - 0,86d + 14,468$ (рис. 11). Средняя ошибка приближения на этом интервале составляет 2,11 %, что показывает хорошее соответствие расчетных и фактических данных.

Для $300 \leq d \leq 600$ получим формулу $M = 0,065d^2 - 33,69d + 5373,56$ (рис. 12). Средняя ошибка аппроксимации равна 1,13 %, что говорит о хорошем подборе модели к исходным данным.

Уравнения регрессий основных конструктивных характеристик имеют вид:

$$L = 3,114d + 221,26 ; \quad D = 2,58d - 8,73 ; \quad W = 0,376d - 6,193 ;$$

$$p = 1,778d + 69,213 ; \quad j = 0,0004d^2 - 0,0267d + 36,2675 ;$$

$$k = 1,47d - 2,257 ; \quad V = -0,00022d^2 + 0,314d - 6,144 ;$$

$$M = 0,013d^2 - 0,86d + 14,468 \text{ для } 110 \leq d \leq 280 ;$$

$$M = 0,065d^2 - 33,69d + 5373,56 \text{ для } 300 \leq d \leq 600 .$$

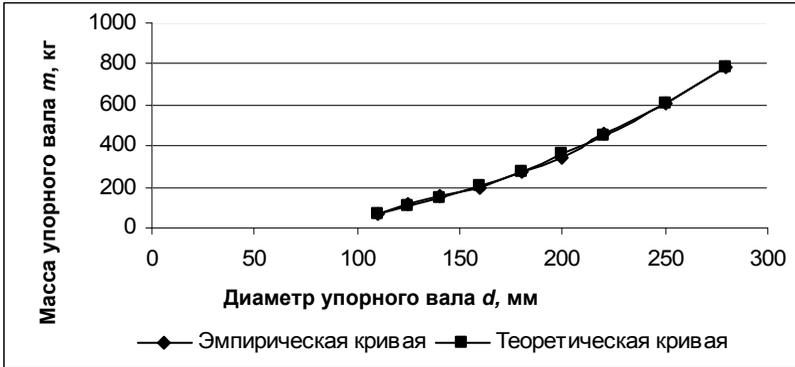


Рис. 11. Зависимость массы упорного вала от его диаметра ($110 \leq d \leq 280$)

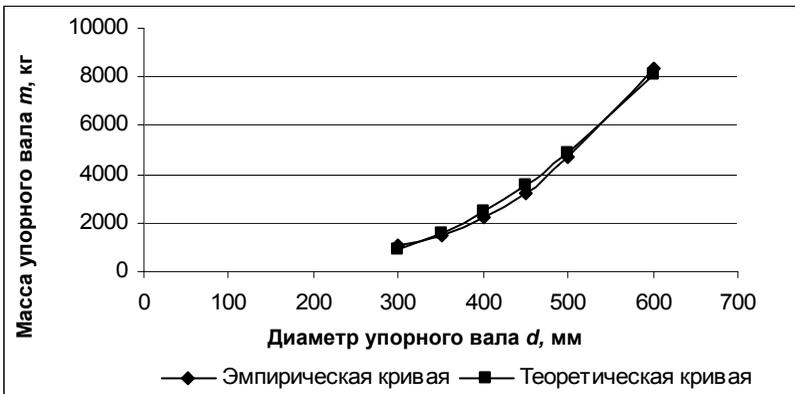


Рис. 12. Зависимость массы упорного вала от его диаметра ($300 \leq d \leq 600$)

Полученные результаты могут быть использованы в конструкторских бюро, в проектных организациях судостроительной промышленности при проектировании судового валопровода, а также студентами и курсантами в дипломном и курсовом проектировании.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАЦИИ ПО ОДНОВРЕМЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ НЕСКОЛЬКИХ СВЕТИЛ

О.В. Немцев; А.А. Барабаш, Дальрыбвтуз, Владивосток

В статье приводятся описание алгоритма и методика его реализации для обработки данных дневных астронавигационных наблюдений, полученных по одновременным наблюдениям нескольких светил. Алгоритм обработки данных реализован в среде электронных таблиц MS Excel. Разработка полезна в качестве тренажёра решения астрономических задач при подготовке судоводителей по программе дисциплины «Мореходная астрономия» и может использоваться в реальной практике судовождения.

В дневное время одновременную астрономическую обсервацию можно получить по наблюдениям Солнца и Луны и несколько реже по наблюдениям трёх светил: Солнца, Луны и Венеры. Одинаковые условия видимости Венеры повторяются приблизительно через 8 лет. Поэтому возможности ее использования для проведения наблюдений в разные годы внутри цикла составляют от 7 до 11 месяцев в году. Луна пригодна для проведения обсерваций в дневное время при фазах ее в виде серпа в возрасте от 2 до 5 дней и 24-27 дней; приблизительно около 8 дней в месяц.

В результате наблюдений светил получают две группы исходных данных: навигационную и астрономическую информацию. В традиционной практике судовождения полученные данные исправляют рядом поправок, рассчитывают экваториальные и горизонтные координаты светил, рассчитывают параметры высотных линий положений, по данным которых графическим путём получают приращение географических координат относительно координат счислимого (ошибочного) места.

Как показывает практика подготовки судоводителей³, на начальной стадии обучения вероятность безошибочного решения этих задач у них близка к нулю. Поскольку учебный план жёстко детерминирован, а времени на большое количество консультаций нет ни у студентов, ни у преподавателя, то для преодоления этой ситуации и был разработан тренажёр обработки астрономической обсервации, реализованный в среде электронных таблиц Microsoft Excel. Версия таблиц, начиная с 1995 г., практически не имеет значения. Этапы решения задачи на листах электронной таблицы полностью имитируют ручные вычисления и графические построения на бумаге, позволяя в наглядной форме выявлять допущенные ошибки и их влияние на результаты обсервации.

³ Мореходную астрономию курсанты-судоводители изучают на 4-5 курсах

Обработку результатов астрономических наблюдений можно отобразить в виде последовательного алгоритма, состоящего из восьми блоков:

1. Расчёт гринвичской даты D_{gp} и всемирного времени T_{gp} наблюдений каждого светила.

2. Расчёт экваториальных координат светил – местных часовых углов t_M и склонений δ – с помощью ежедневных таблиц Морского астрономического ежегодника (МАЕ).

3. Исправление отсчётов секстана и расчёт обсервованных высот – h_o с помощью таблиц поправок МАЕ.

4. Приведение обсервованных высот к зениту последнего наблюдения – $h_{пр}$.

5. Расчёт счислимых высот и азимутов светил – h_c и A_c – с помощью Таблицы для вычисления высот и азимутов светил (ТВА-52) и получение переносов – n .

6. Вычисление координат места выполняется в два этапа:

6.1) расчет приращений координат – $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ – аналитическим или графическим путём относительно счислимого места;

6.2) вычисление координат обсервованного места – φ_o и λ_o .

7. Оценка точности обсервации удвоенным значением радиальной погрешности – $2M$.

Прежде чем перейти к описанию блоков этого алгоритма, отметим, что в судовождении используется особая многомерная система счета времени, углов и расстояний. Так, время включает дату, часы, минуты и секунды, углы содержат градусную, минутную части и дополняются наименованиями и т.д. Поэтому для обработки таких чисел приходится вначале привести их к десятичному виду, затем выполнить с ними необходимые математические операции и только уж затем представить пользователю в привычной многомерной форме.

Из многих вариантов для обработки числовой навигационной информации нами был выбран способ отдельного ввода данных в ячейки электронной таблицы. Например (рис. 1), если задана широта $\varphi = 43^\circ 17,5' S$, то она должна быть записана в три ячейки по горизонтали: 43; 17,5; S, а для внутренней обработки преобразована либо в десятичное число – $(43+17,5/60) * -1 = -43,292$, либо число в радианах – $-43,292 * \text{ПИ}()/180 = 0,7555821$. Для вывода искомого результата преобразования выполняются в обратном порядке.

	A	B	C	D
1	параметр	град.	мин.	наимен
2	$\varphi_{с1} (^\circ ') =$	42	1,0	N
3	$\lambda_{с1} (^\circ ') =$	132	2,1	E
4				

Рис. 1. Пример ввода данных в ячейки электронной таблицы

Покажем пункты этого алгоритма в развёрнутом виде.

1. Текущая дата на меридиане Гринвича определяется по текущему судовому времени T_c и номеру часового пояса T_c в виде простого соотношения:

$$\approx T_{ep} = T_c \pm N_{ep} \frac{W}{E}, \quad (1)$$

имеющего сложную для машинного решения логическую основу:

- если $\approx T_{ep}$ остаётся в пределах 24 часов, то D_{ep} совпадает с судовой датой – $D_{ep} = D_c$;
- если $\approx T_{ep}$ превышает 24 часа, то 24 часа отбрасываются, а дата увеличивается на сутки – $D_{ep} = D_c + 1$;
- если $\approx T_{ep}$ получается меньше 0, то к результату добавляют 24 часа, а дату уменьшают на сутки – $D_{ep} = D_c - 1$.

В электронной таблице решение формулы (1) выполняется следующим образом:

$T^h + T^m / 60$ – преобразование часов и минут в десятичное число;

ЕСЛИ(наименование N_{ep} ="E", то значение N_{ep} *-1; иначе N_{ep}) – изменить или оставить без изменения знак числа часового пояса;

ЕСЛИ($T_c + N_{ep} >= 24$, то $(T_c + N_{ep}) - 24$; ЕСЛИ($T_c + N_{ep} < 0$, то $(T_c + N_{ep}) + 24$ иначе $T_c + N_{ep}$) – вычисление времени на меридиане Гринвича;

ЕСЛИ(И(N_{ep} ="E"; $T_c - N_{ep} < 0$) то $D_c - 1$; ЕСЛИ(И(N_{ep} ="W"; $T_c + N_{ep} > 24$) то $D_c - 1$ иначе D_c) – определение даты на Гринвиче.

Точное время каждого наблюдения на меридиане Гринвича $T_{ep,i}$ вычисляется по показаниям хронометра на момент пуска секундомера T_{xp} , показаниям секундомера $T_{сек,i}$ и поправки хронометра u_{xp} с добавлением 12^h , если полученное $\approx T_{ep}$ отличается от показаний прибора на 12^h :

$$T_{ep,i} = T_{xp} (+12^h) + T_{сек,i} + u_{xp}. \quad (2)$$

В электронных таблицах для обработки точного времени в трёхмерной форме (ч:м:с), включающей часы, минуты и секунды, используется формат чисел «дата – время», а искомое время вычисляется как сумма трёх моментов с проверкой знака поправки хронометра, которое для дальнейшего использования переводится в десятичную форму:

ЕСЛИ (знак u_{xp} = "-" то $T_{xp} + T_{сек,i} - u_{xp}$ иначе $T_{xp} + T_{сек,i} + u_{xp}$) – текущее время каждого наблюдения в формате ч:м:с;

$(T_{ep, i} - \text{ЦЕЛОЕ}(T_{ep, i})) * 24$ – текущее время каждого наблюдения в десятичном формате текущего часа.

В этом же блоке вычисляются разности моментов между последним и текущим наблюдениями $\Delta T_i = T_n - T_i$, необходимые для вычисления поправки для приведения высоты светила к зениту последнего наблюдения Δh_z . Разности моментов вычисляются в минутах и их долях с точностью до двух знаков после запятой. При этом вначале проверяется количество светил N , принятых для наблюдений (от 2 до 4), а затем вычисляются разности моментов:

ОКРУГЛ(ЕСЛИ($N = 4$ то $T_4 - T_3$; ЕСЛИ($N = 3$ то $T_3 - T_2$ иначе $T_2 - T_1$))*60;2).

2. Расчёт экваториальных координат светил. Координаты Солнца, Луны и Венеры (t_m – часовой угол, δ – склонение) в течение суток изменяются быстро и неравномерно и вычисляются традиционно по данным, выбираемым из Морского астрономического ежегодника (МАЕ) на гринвичские моменты их наблюдения:

$$\begin{aligned} t_M^{cs} &= t_T^{cs} + \Delta_1 t + \Delta_2 t \pm \lambda_W^E, \\ \delta^{cs} &= \delta_T^{cs} + \Delta \delta \end{aligned} \quad (3)$$

где: t_T^{cs} и δ_T^{cs} – координаты светила на целый час T_{ep} ; $\Delta_1 t$ – приращение часового угла за минуты и секунды; $\Delta_2 t$ – поправка за квазиразность; $\Delta \delta$ – поправка за разность (Δ); если $t_M^{cs} > 360^\circ$, то $t_{np}^{cs} = t_M^{cs} - 360^\circ$ и наименование W ; если $180^\circ < t_M^{cs} < 360^\circ$, то $t_{np}^{cs} = 360^\circ - t_M^{cs}$ и наименование E ; наименование δ^{cs} выбирается из таблиц.

Для вычисления экваториальных координат светил в электронной таблице использован смешанный способ обработки данных: из МАЕ – выбираются табличные значения координат t_T^{cs} и δ_T^{cs} , квазиразности и разности, а все последующие вычисления, логические операции и операции сравнения выполняются по табличным формулам.

Вычисление местного часового угла:

$\Delta_1 t - (T_{ep} - \text{ЦЕЛОЕ}(T_{ep})) * \Delta t$; где Δt – изменение t за 1 час: $\Delta t^{c, \text{пл}} = 14,9833$; $\Delta t^c = 14,3167$, $\Delta t^* = 15,0417$;

$\Delta_2 t - \text{ОКРУГЛ}((T_{ep} - \text{ЦЕЛОЕ}(T_{ep})) * \text{квазиразность}; 1)$;

градусная часть t_{ep}^{cs} ($^\circ$) – ЕСЛИ($t_T^{cs} + \Delta_1 t + \Delta_2 t > 60$ то $(t_T^{cs} + \Delta_1 t + \Delta_2 t) + 1$ иначе $(t_T^{cs} + \Delta_1 t + \Delta_2 t)$);

минутная часть t_{ep}^{cs} ($'$) – ЕСЛИ($t_T^{cs} + \Delta_1 t + \Delta_2 t > 60$ то $t_T^{cs} + \Delta_1 t + \Delta_2 t - 60$ иначе $t_T^{cs} + \Delta_1 t + \Delta_2 t$);

t_M^{ce} – ЕСЛИ($t_{ep}^{ce} + \lambda > 360$ то $t_{ep}^{ce} + \lambda > -360$ иначе $t_{ep}^{ce} + \lambda$);
 t_{np}^{ce} – ЕСЛИ(И ($t_{ep}^{ce} + \lambda < 360$; $t_{ep}^{ce} + \lambda \geq 180$) то $360 - t_{ep}^{ce} + \lambda$; иначе $t_{ep}^{ce} + \lambda$);

наименование t_M^{ce} – ЕСЛИ(И($t_M^{ce} < 360$; $t_M^{ce} \geq 180$) то "E" иначе "W").

Вычисление склонения:

поправка за разность – ОКРУГЛ($(T_{ep} - \text{ЦЕЛОЕ}(T_{ep})) * \Delta; 1$);

градусная часть $\delta^{ce}(\circ)$ – ЕСЛИ($\delta + \Delta > 60$ то $\delta^\circ + 1$; ЕСЛИ ($\delta + \Delta < 0$ то $\delta^\circ - 1$ иначе δ°));

минутная часть $\delta^{ce}(')$ – ЕСЛИ($\delta' + \Delta > 60$ то $(\delta' + \Delta) - 60$ иначе $(\delta' + \Delta)$).

Пользовательский вид процесса вычисления экваториальных координат светил на листе электронной таблицы показан на рис. 2.

Часовые углы и склонения светил											
Δ'	2,8	0,2			1,2	-1			16,2	13,2	
Св.	Венера				Солнце				Луна		
t_T^{ce}	259	59,6		2	226	2,7		2	200	49,9	
Δt_1	1	3,2			1	46,1			2	26,7	
Δt_2		0,2				0,1				2,8	
$t_{гр}^{ce}$	261	3,0		#	227	48,9		#	203	19,4	
$\pm \lambda$	132	2,1	E	#	132	2,1	E	#	132	2,1	E
t_M^{ce}	33	5,1	W	#	359	51,0	W	#	335	21,5	W
t_{np}^{ce}	33	5,1	W	0	0	9,0	E	#	24	38,5	E
δ	9	51,9	N		3	35,6	N		11	2,7	S
$\Delta \delta$		0		4		-0,1		#		2,3	
δ^{ce}	9	51,9	N		3	35,5	N		11	5,0	S

Рис. 2. Пример вычисления экваториальных координат светил с имитацией ручных вычислений. В затемнённые ячейки вводятся исходные данные. Остальные ячейки обрабатываются автоматически

Исходные данные, необходимые для дальнейшей обработки, заносятся в строки, обозначенные на рис. 2 символами: Δ' (значения квазиразностей и разностей); t_M^{ce} – часовые углы светил и δ – склонения светил на целый час T_{ep} .

3. Исправление измеренных высот светил. Этот процесс включает в себя ряд операций, позволяющих перейти от показаний секстана (OC) при измерении вертикального угла между направлениями на край светила и плоскость видимого горизонта к теоретическому углу при центре Земли h_0 , освобождённому от искажающего влияния астрономической и земной рефракции. В практике астронавигации исправление высот представляет собой процесс получения ряда поправок из таблиц МАЕ или МТ и добавление этих поправок к OC . Набор поправок зависит от наблюдаемого светила:

$$\left. \begin{aligned} h^* &= OC^* + \Delta_{oc} + \Delta h_d + \Delta h_\rho + \Delta h_t + \Delta h_B; \\ h^c &= OC^c + \Delta_{oc} + \Delta h_d + \Delta h_{\rho+p} + \Delta h_t + \Delta h_B + R^c; \\ h^{nn} &= OC^{nn} + \Delta_{oc} + \Delta h_d + \Delta h_\rho + \Delta h_p + \Delta h_t + \Delta h_B; \\ h_{нк}^n &= OC_n + \Delta_{oc} + \Delta h_d + ОП_n + \Delta h_{лнк} + \Delta h_t + \Delta h_B; \\ h_{вк}^n &= OC_n + \Delta_{oc} + \Delta h_d + ОП_n + \Delta h_{лвк} - 30' + \Delta h_t + \Delta h_B \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где $\Delta_{oc} = i + s$ – сумма поправки индекса и инструментальной поправки; i получают из наблюдений; s выбирают из аттестата;

$\Delta h_d = 1,76\sqrt{e_{эл}}$ – поправка за наклонение, где $e_{эл}$ – высота наблюдателя над уровнем моря;

$\rho = \Delta h_\rho + \Delta h_t + \Delta h_B$ – поправка за астрономическую рефракцию;

может определяться по раздельности в виде суммы трёх поправок либо в виде единой поправки по формуле из МТ-2000:

$$\rho = \left(\frac{26 - 3,6 \cdot t + 1,3332 \cdot B}{1000} \right) / \operatorname{tg} \left(h_e + \frac{7,34}{h_e + 4,4} \right), \quad (5)$$

где $h_e = OC + \Delta_{oc} + \Delta h_d$ – видимая высота светила; B – давление воздуха, мм рт. ст.; t – температура воздуха, °С; Δh_p – поправка за параллакс: для Солнца $\Delta h_p = (8,8 \cdot \cosh_e) / 60$; для планет и Луны – $\Delta h_p = p_0 \cdot \cosh_e$; p_0 – выбирается из ежедневных таблиц МАЕ; $R^\odot = 16,05 + \cos(M / 2,1) / 3,333$ – видимый радиус Солнца, величина которого зависит от M – номера месяца в году.

4. Приведение высот к зениту последних наблюдений. При одновременных наблюдениях в дополнение к набору поправок, показанному в предыдущем пункте, необходима поправка для приведения высот к зениту последнего наблюдения Δh_z , величина которой зависит от скорости судна V , курсового угла на светило – $q = A - IK$ и разности моментов наблюдения между текущим и последним моментом – $\Delta T^M = T_n - T_i$:

$$\Delta h_z = \frac{V}{60} \cos(A - IK) \cdot \Delta T^M. \quad (6)$$

При ручной обработке данных исправление высот производится в пошаговом режиме в виде перехода от показаний секстана OC к измеренной высоте – $h_{изм} = OC + (i + s)$, затем к видимой высоте – $h_e = h_{изм} + \Delta h_d$ и далее к топоцентрической высоте – $h' = h_e + \Delta h_p$.

Приведение высоты к центру Земли (геоцентрическая высота) и центра светила к линии горизонта выполняется с помощью поправки за параллакс Δh_p и видимый радиус светила $\pm R$ (при измерениях нижнего (+) и верхнего края (–) диска светила), для вычисления которых используются несовпадающие формулы.

В электронной таблице процесс исправления высот может быть организован следующим образом (рис. 3):

	Св.	Венера		Солнце		Луна	
	OC	46	49,5	51	26,9	31	26,3
	i		0,4		0,4		0,4
	s		0,3		0,1		0,1
	$h_{изм}$	46	50,2	51	27,4	31	26,8
	Δh_d		-6,0		-6,0		-6,0
0	h_e	46	44,2	51	21,4	31	20,8
##	Δh_p		-0,9		-0,8		-1,8
32	Δh_p		0,3		0,1		46,2
32	R				15,9		14,9
52	h_o	46	43,6	51	36,6	32	20,3
52	Δh_z		1,3		0,5		0,0
47	$h_{тр}$	46	44,9	51	37,1	32	20,3
47	h_c	46	43,0	51	34,5	32	16,6
2	n'		1,9		2,6		3,7

Рис. 3. Пример исправления измеренных высот светил, имитирующий ручные вычисления. Исходные данные вводят в ячейки, выделенные рамкой, а в остальных – обрабатываются автоматически

$h_{\text{УЗМ}}^{\circ}$ – ЕСЛИ((OC' + i' + s') > 60 то OC° + 1; ЕСЛИ((OC' + i' + s') < 0; OC°-1 иначе OC°));

$h_{\text{УЗМ}}^{\prime}$ – ЕСЛИ((OC' + i' + s') > 60 то (OC' + i' + s') - 60; ЕСЛИ((OC' + i' + s') < 0 то (OC' + i' + s') + 60) иначе (OC' + i' + s'));

Δh_{ρ} – ОКРУГЛ(-1,76* $e_{\text{ГЛ}}^{\wedge}(0,5)$;1);

h_{e}° и h_{e}^{\prime} – вычисляются так же, как и измеренная высота;

Δh_{ρ} – (((26 - 3,6*t_в + 1,3332*B_в)/1000) / TAN(((h_{e}° + h_{e}^{\prime})/60) + 7,34 / ((h_{e}° + h_{e}^{\prime} / 60) + 4,4))*ПИ()/180)) – см. формулу (4);

Δh_{ρ} – ЕСЛИ(светило = "Венера" то ОКРУГЛ(p_0 *COS((h_{e}° + h_{e}^{\prime} / 60)* ПИ() / 180);1) иначе " ") – параллакс Венеры;

Δh_{ρ} – ЕСЛИ(светило = "Солнце" то ОКРУГЛ((8,8*COS(РАДИАНЫ(h°)) / 60;1) иначе " ") – параллакс Солнца;

Δh_{ρ} – ЕСЛИ(светило = "Луна" то ОКРУГЛ(p° * COS(РАДИАНЫ(h_{e}° + (h_{e}^{\prime} + p°)/60));1) иначе " ") – параллакс Луны;

h_z – V*COS(РАДИАНЫ(A-K))* ΔT_i /60 – поправка для приведения к зениту последних наблюдений;

$h_{\text{пр}}^{\circ}$ и $h_{\text{пр}}^{\prime}$ – вычисляются так же, как и измеренная высота: при вычислении минутной части проверяется условие нахождения числа в пределах 60'.

5. Расчёт счислимых высот и азимутов светил – h_c и A_c . Для вычисления горизонтных координат светил нами использована система формул «тангенсов»

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} x &= \operatorname{tg} \delta \sec t; \\ y &= 90^{\circ} + (x \sim \varphi); \\ \operatorname{tg} A &= \frac{\operatorname{tg} t \sec y}{\sec x}; \\ \operatorname{tg} h &= \frac{\operatorname{tg} y}{\sec A} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

реализованная в виде специальных таблиц ТВА-52 (МАЕ) и ТВА-57 (МТ-2000). Тригонометрические функции формул (6) в этих таблицах заменены видоизменёнными значениями десятичных логарифмов:

$$T(\alpha) = 2 \cdot 10^4 \lg \operatorname{tg} \alpha + 70725 \text{ и } S(\alpha) = 2 \cdot 10^4 \lg \sec \alpha.$$

В результате такой замены в таблицах присутствуют в основном положительные функции, а арифметические действия умножения и

деления заменяются на операции сложения и вычитания, как это показано в формулах (7):

$$\left. \begin{aligned} T(x) &= T(\delta) + S(t); \\ T(A) &= T(t) - S(x) + S(y); \\ T(h) &= T(y) - S(A) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Вычисления в таблицах ТВА ведутся по специально разработанным схемам (рис. 4), в которые заносятся значения функций, выбранные из таблиц. Искомые значения аргументов h и A получают по вычисленным значениям функций $T(A)$ и $T(h)$ обратным входом в таблицы.

По такому же принципу организован имитационный вычислительный процесс на листе электронных таблиц. Исходные данные (δ – склонение, t_m – часовой угол и φ – широта места) по раздельности (градусы, минуты, наименования) автоматически копируются с предыдущего листа в соответствующие ячейки схемы, показанной на рис. 4.

В самой таблице вычисляются значения функций в соответствии с формулами (7), например, значение $T(\delta)$ вычисляется по табличной формуле

$$\text{ОКРУГЛ}(\text{LOG10}(\text{TAN}((\delta^\circ + \delta'/60)*\text{ПИ}()/180)))*2*10^4;0)+70725.$$

1	Данные			Венера					
Арг.	Наим.	град.	мин.						
	°		до 0,1'						
δ	N	9	52	$T(\delta)$	55531				
t	W	33	5,1	$S(t)$	1536	$T(t)$	67003		
x	N	11	43,5	$T(x)$	57067	$S(x)$	183		
φ_c	N	42	1,0			$T(\varphi)$	66820		
y		120	17,5			$S(y)$	5944	$T(y)$	75394
A_c		51	39,8	$51,7^\circ$ SW	$T(A)$	72764	$S(A)$	4148	
h_c		46	43,0	$A_{\text{зр}} = 231,7$				$T(h)$	71246

Рис. 4. Пример вычисления h_c и A_c с имитацией схемы ручных вычислений по таблицам ТВА

Для получения значений искомых аргументов по вычисленным значениям функций использованы обратные функции с проверкой некоторых логических условий. Например, при вычислении величины x про-

веряется величина часового угла, так как в зависимости от величины t_m значение x может быть больше или меньше 90° :

x° – ЕСЛИ($t_m < 90$ то $(\text{ATAN}(10^{((T(x) - 70725)/(2*10^4))}) * 180/\text{ПИ}())$ иначе $180 - (\text{ATAN}(10^{((T(x) - 70725)/(2*10^4))}) * 180/\text{ПИ}())$).

Вычисленные аргументы преобразуются в два раздельных числа, содержащие градусную и минутную части числа, получают наименование и записываются в соответствующие ячейки строки данных. Например, генерирование значения x в ячейках таблицы производится по формулам:

x° – ЦЕЛОЕ(x°);

x' – ОКРУГЛ($(x^\circ - \text{ЦЕЛОЕ}(x^\circ)) * 60; 1$)

наименование x – копирование наименования δ .

Вспомогательная величина y вычисляется по логической формуле, проверяющей наименование φ и x на их совпадение:

ЕСЛИ(наименование $\varphi =$ наименованию x то $\text{ABS}(\varphi - x) + 90$ иначе $\varphi + x + 90$).

Вычисляемый азимут получается в четвертном счете по табличной формуле

$$(\text{ATAN}(10^{((T(A) - 70725)/(2*10^4))}) * 180/\text{ПИ}()),$$

затем ему назначается наименование четверти на основании логической формулы $\text{если}(\text{и}())$:

СЦЕПИТЬ(ЕСЛИ(И(наименование $\varphi =$ наименованию x ; $x > \varphi$) то наименование по наименованию широты иначе противоположно); наименование часового угла).

В результате исследования получается одна из четырёх комбинаций наименований: NE, SE, SW, NW. Окончательно по величине и наименованию азимут переводится в круговой счёт с помощью вложенных логических операторов ЕСЛИ (ЕСЛИ (ЕСЛИ (ИНАЧЕ))):

ЕСЛИ(наименование = "NE" то A ; ЕСЛИ(наименование = "SE" то $180 - A$; ЕСЛИ(наименование = "SW" то $A + 180$ иначе $360 - A$)).

Искомая высота светила получается в четвертном счёте и не требует особых преобразований за исключением разделения полученного угла на градусную и минутные части:

$$(\text{ATAN}(10^{((T(h) - 70725)/(2*10^4))}) * 180/\text{ПИ}()).$$

6. Расчёт координат обсервованного места φ_0 , λ_0 . Эта процедура включает две операции: вычисление приращений координат $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$ и вычисление самих обсервованных координат.

Если обсервация выполнена по наблюдениям трёх и более светил, а в измерениях и вычислениях нет систематических погрешностей, то для вычисления $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$ может использоваться метод наименьших квад-

ратов (МНК) в аналитической форме, наиболее подходящий для машинного решения.

Обозначив $\cos A = a$, $\sin A = b$ и $h_{np} - h_c = n$, можно представить конечные формулы для вычисления приращений координат на плоскости в виде

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi &= \frac{\sum b^2 \sum na - \sum ba \sum nb}{\sum a^2 \sum b^2 - \sum (ba)^2}; \\ \Delta w &= \frac{\sum a^2 \sum nb - \sum ba \sum na}{\sum a^2 \sum b^2 - \sum (ba)^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

При переносе поправок координат на навигационную карту или вычисления обсервованных координат отшествие Δw заменяется на разность долгот $\Delta\lambda = \Delta w / \cos \varphi$.

В электронной таблице для обеспечения наглядности процесс вычисления приращений координат представлен в виде таблицы, показанной на рис. 5. В столбцах этой таблицы отражаются вычисленные элементы формулы (8) для каждой линии, суммируемые по строкам в столбце «Сумма». В последней строке этой таблицы символом «D» обозначен знаменатель формул (8).

№ линии	1	2	3			
Азимуты	231,7	179,8	151,1			
Переносы	1,9	2,6	3,7			
$a_i = \cos A_i$	-0,62	-1	-0,875	0	0	Сумма
$b_i = \sin A_i$	-0,785	0,0035	0,4833	0	0	
a_i^2	0,3841	1	0,7664	0	0	2,15055
b_i^2	0,6159	1E-05	0,2336	0	0	0,84945
$a_i \cdot b_i$	0,4864	-0,0035	-0,423	0	0	0,0598
$n_i \cdot a_i$	-1,178	-2,6	-3,239	0	0	-7,0168
$n_i \cdot b_i$	-1,491	0,0091	1,7881	0	0	0,30615
D	1,8232					

Рис. 5. Пример табличной формы для вычисления аргументов $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$ формулы (8)

Конечный результат вычисления obserвованных координат выведен в отдельный блок, показанный на рис. 6.

Результаты:			
$T_c =$	13ч10м		
$\varphi_c =$	42	1,0 N	42
$\Delta\varphi =$		-3,3 S	-0
$\varphi_o =$	41	57,7 N	42
$\Delta w (^{\circ})$	0,59		
$\lambda_c =$	132	2,1 E	##
$\Delta\lambda =$		0,79 E	0
$\lambda_o =$	132	2,9 E	##

Рис. 6. Приращения и obserвованные координаты места

Значение $\Delta\varphi$ вычисляется по данным из таблицы, показанной на рис. 5, на основании табличной формулы

$$\text{ЕСЛИ}(D = 0 \text{ то } 0 \text{ иначе } \text{ОКРУГЛ}((\sum b^2 \sum na - \sum ba \sum nb) / D ; 1)).$$

Наименование приращения $\Delta\varphi$ вычисляется по знаку числа: если знак «-», то наименование S, если «+», то – N.

Разность долгот вычисляется в два этапа. Вначале рассчитывается отстояние Δw по табличной формуле

$$\text{ОКРУГЛ}(\sum a^2 \sum nb - \sum ba \sum na / D ; 2),$$

а затем разность долгот $\Delta\lambda$ и соответствующее наименование (E или W): E, если число положительное, и W, если оно отрицательное.

Полученные поправки добавляются в соответствии с их знаками со счислимыми координатами (рис. 6), и в результате получаются искомые obserвованные координаты:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_o &= \varphi_c + \Delta\varphi, \\ \lambda_o &= \lambda_c + \Delta\lambda \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

7. Оценка точности obserвации. Формулы, выбранные для оценки точности obserвованного места, учитывают только случайные погрешности в линиях и предполагают, что наблюдения и их обработка равноточны. В этом случае величина радиальной погрешности M_o , вероятность которой составит $P = 68 \%$, может быть рассчитана по формуле

$$M_o = \pm \sqrt{\frac{k \cdot m_n^2}{\sum \sin^2 \Delta A}}, \quad (11)$$

где k – количество линий положения; m_n – средняя квадратическая погрешность линии, величина которой в зависимости от опыта наблюдателя, наблюдаемого светила и времени суток может заключаться в пределах $\pm 0,5'$ - $\pm 1,2'$ (в среднем $\pm 0,7'$); ΔA – разность азимутов.

В электронной таблице радиальная погрешность обсервованного места для трёх линий положения на основании формулы (11) вычисляется из выражения:

$$m_n * \text{КОРЕНЬ}(k / (\text{SIN}(\text{РАДИАНЫ}(\text{ABS}(A_1 - A_2)))^2 + \text{SIN}(\text{РАДИАНЫ}(\text{ABS}(A_2 - A_3)))^2 + \text{SIN}(\text{РАДИАНЫ}(\text{ABS}(A_1 - A_3)))^2)).$$

Для повышения вероятности до оценки точности обсервации до 90-95 % полученное значение M_o удваивается, и тогда конечное значение оценки точности $2M_o$ при обсервациях по трём светилам вычисляется из табличного выражения:

$$\text{ЕСЛИ}(k = 3 \text{ то } 2 * \text{ОКРУГЛ}(M_o \text{ в лп}; 1) \text{ иначе } 2 * \text{ОКРУГЛ}(M_o \text{ в лп}; 1)).$$

В заключение отметим, что в отличие от известных систем автоматизации обработки астрономической обсервации данная разработка отличается простотой для освоения, наглядностью обработки данных на всех этапах решения задачи, возможностью их редактирования и может использоваться как в учебной практике, так и практике реального судовождения.

УДК 629.12.4

АНАЛИЗ КОРАБЛЕКРУШЕНИЯ СУПЕРТАНКЕРА С НЕФТЬЮ

А.Н. Соболенко, Дальрыбвтуз, Владивосток

Выполнен анализ развития аварийной ситуации, приведшей к кораблекрушению норвежского супертанкера «Брайер» с грузом сырой нефти. Проанализированы действия ответственных лиц судового экипажа, определены их ошибки и правильные действия.

5 января 1993 г. произошло кораблекрушение супертанкера «Брайер», и в море вылилось около 84,7 тыс. т сырой нефти. Это была крупнейшая экологическая катастрофа в то время.

Танкер «Брайер» был построен в 1975 г. Его основные характеристики: длина – 241,5 м; ширина – 40 м; осадка – 18,8 м; дедвейт – 89730 т. На судне установлен главный дизель «Сумимото-Зульцер» номинальной мощностью 11390 кВт при частоте вращения 118 мин⁻¹. В составе СЭУ входят также два ВДГ мощностью по 880 кВт каждый, вспомогательный паровой водотрубный котёл (ВПК), вырабатывающий пар давлением 1,6 МПа. Эксплуатационная скорость судна – 14,5 уз.

3 января в 08 ч 37 мин в норвежском порту Могстрад была завершена погрузка на судно 84,7 тыс. т сырой нефти. Был получен прогноз погоды – южный штормовой ветер силой 10 баллов.

В 13 ч 00 мин танкер вышел из порта и взял курс 243 из-за южного штормового ветра. Главная установка сначала работала на дизельном топливе, ВПК – на тяжёлом топливе. В 13 ч 10 мин главный дизель перевели на тяжёлое топливо.

В 14 ч 00 мин судно вышло в открытое море. Начались сильный слеминг, бортовая качка, морская вода заливала всю палубу. Боцман доложил старпому, что на корме и носу судна всё хорошо закреплено.

4 января в период с 08 ч 00 мин до 10 ч 00 мин старший помощник и старший механик заметили, что четыре трубных секции, складированные на верхней палубе, раскрепилась и свободно катались между кожухом выхлопной трубы и перилами судна. Каждая трубная секция имела 5 м длины и диаметр 0,5 м. О сложившейся ситуации было доложено капитану, который решил ничего не предпринимать, пока не прояснится погода. До 20 ч 00 мин вахтенные штурманы провели всё время на мостике, не выходя наружу. Из кают-компании старший механик и старший помощник заметили, что трубные секции катались по палубе и бортовое ограждение было погнуто. Погодные условия не улучшались.

4 января в период 20 ч 30 мин – 23 ч 30 мин сработала сигнализация по давлению ВПК при давлении 1,2 МПа. Третий механик, стоявший на вахте, заметил неполадки в воздухоподающей системе. Он остановил котёл, чтобы произвести ремонт. Перед остановкой ВПК был переведён на дизельное топливо. В 21 ч 30 мин произвели запуск ВПК, но сразу же после запуска пламя в топке погасло. Давление пара в котле снизилось до 0,3 МПа, упала температура топлива на ГД и возросла его вязкость. Вахтенный механик проинформировал о возникшей проблеме старшего механика и перевёл ГД на дизельное топливо. Однако старший механик, зная о возникшей проблеме, не предпринял никаких действий.

5 января в период с 00 часов до 02 ч 00 мин второй механик, заступивший на вахту, пытался несколько раз безуспешно запустить ВПК. Был отсоединен подвод топлива от трубопровода к форсунке ВПК, а также обнаружено, что топливо сильно загрязнено водой. Была произведена замена форсунки, но ВПК не запускался в работу. ГД продолжал работать на дизельном топливе, так как давление пара было менее 0,3 МПа и производить подогрев тяжёлого топлива было невозможно.

В 2 ч 30 мин механик-суперинтендант обнаружил в машинном отделении, что ГД работает на дизельном топливе, а форсунка ВПК не зажигается, вахтенный механик проинформировал его о сильном загрязнении тяжёлого топлива морской водой. Вновь была предпринята попытка запустить ВПК, для чего был рассоединен трубопровод подвода топлива к ВПК и были удалены вода, осадок и загрязнённое топливо. Но и эти действия не помогли устранить неполадки.

С 2 ч 30 мин до 4 ч 00 мин в машинное отделение был вызван старший механик. Были произведены следующие действия: проверены дренажные клапаны в отстойных танках, где находилась смесь воды и топлива; проверен дренажный клапан расходной цистерны, где также было загрязнение дизельного топлива водой, но несколько меньше. Мотористу было поручено продолжать дренаж до тех пор, пока не появится незагрязнённое дизельное топливо. Сепаратор дизельного топлива непрерывно находился в работе и работал удовлетворительно.

Примерно в 4 ч 00 мин частота вращения ГД была снижена до 85 мин⁻¹ с целью экономии дизельного топлива. В 4 ч 10 мин капитан, обсудив с суперинтендантом ситуацию, изменил курс судна с тем, чтобы стать на якорь в ближайшем фиорде Морей, находившемся на расстоянии 100 миль к юго-востоку.

Однако ситуация на судне вышла из-под контроля. В 4 ч 40 мин ГД медленно сбросил обороты и остановился; в 4 ч 42 мин остановились ВДГ, и СЭУ вышла из строя. Судомеханическая служба продолжала дренаж воды из расходных цистерн. Судно находилось примерно в 10 милях от м. Самбург.

В 5 ч 15 мин капитан проинформировал береговую охрану, о сложившейся ситуации, но помощь не запросил. В 5 ч 26 мин береговая охрана связалась с капитаном, который уже просил прислать буксир. В 5 ч 36 мин суперинтендант проинформировал о ситуации спасательную службу США. На судне продолжались попытки дренировать воду из топлива. Судно находилось в 6 милях к югу от м. Самбург. В 6 ч 00 мин вертолёт спасательной службы получил задачу следовать на терпящий бедствие танкер «Брайер».

В 6 ч 40 мин началась эвакуация экипажа с судна, и к 8 ч 07 мин на борту оставалось минимальное количество членов экипажа, продолжавшего попытки дренировать воду из топлива. В 8 ч 54 мин была завершена эвакуация оставшегося персонала судна. Судно находилось в 0,75 мили от м. Самбург.

С 9 ч 14 мин до 9 ч 35 мин план высадить добровольцев на бак, чтобы отдать якорь, был отвергнут из-за близости фок-мачты, которая исключала возможность безопасной работы вертолета над носом судна. Буксирное судно в это время находилось в полумиле от терпящего бедствие танкера.

С 9 ч 45 мин до 10 ч 55 мин вертолёт высадил спасательную команду на корму судна, чтобы закрепить буксирный трос, но в послед-

ний момент закрепить трос не удалось, и вертолёт срочно эвакуировал людей.

В 11 ч 19 мин танкер «Брайер» перевернулся с полной потерей груза на борту.

Проанализируем ситуацию, особенно действия ответственных членов экипажа.

Капитан судна.

Когда капитан поднимался на мостик судна 3 и 4 января, маловероятно, что он обходил снаружи рулевую рубку при этом. Старпом и второй штурман заявили, что они несли вахту в рулевой рубке, не выходя из неё, и высока вероятность, что третий штурман поступал точно так же. Второй штурман сообщил, что третьего января в 16 ч 00 мин, т.е. через три часа после выхода судна в море, посылал вахтенного матроса проверить крепление спасательной лодки правого борта. Но другие вахтенные штурманы (старпом и третий штурман) никого не посылали на палубу, и сами не выходили из рулевой рубки.

Таким образом, очевидно, что со стороны вахтенной штурманской службы не было предпринято никаких усилий для тщательной проверки состояния закрепления находящихся на палубе запасных трубных секций, кислородных и ацетиленовых баллонов, бочек с гидравлическим маслом.

На судне палуба перед мостиком в целом просматривается из рулевой рубки. И только часть верхней палубы попадает под обзор при осмотре через иллюминаторы рулевой рубки – это область к корме, где находятся швартовные лебёдки. Место на палубе, где были складированы запасные трубные секции, не видна из рулевой рубки. Если выйти из рулевой рубки на кормовой конец палубы капитанского мостика и посмотреть вниз, то вся верхняя палуба вплоть до кожуха трубы хорошо просматривается. Левая часть палубы возле кожуха трубы (где хранились запасные трубные секции) хорошо просматривается из кают экипажа, на мостике и кают-компания экипажа. Таким образом, регулярный контроль складирования запасных трубных секций можно было легко осуществлять, не выходя на палубу. Кислородные и ацетиленовые баллоны и бочки с гидравлическим маслом можно было наблюдать через иллюминаторы с кормовой части помещений палубы спасательных шлюпок и иллюминаторы левого борта кают-компания комсостава.

Инструктаж капитана для вахтенных штурманов, касающийся регулярного контроля верхней палубы, чтобы была гарантирована безопасность судна при плохой погоде, видимо, был не полным. По инструкции ночью вахтенный штурман был обязан освещать прожектором территорию вокруг помещений с мостика каждые 12 мин. Из сообщений старшего помощника и второго штурмана известно, что они провели свои вахты внутри рулевой рубки. Отсюда следует, что этот инструктаж либо не исполнялся, либо не был доведён до сведения комсостава.

Капитан был осведомлён о размерах трубных секций, поскольку он проверял их после завершения укладки, но получив сообщение, что они не закреплены утром 4 января, не предпринял никаких действий. Старший механик сообщил, что он информировал капитана о повреждении воздушных труб. В любом случае капитан должен был контролировать ситуацию.

Любой член экипажа мог обратить внимание на то, что на палубе сложилась внештатная ситуация, но ничего нельзя было сделать с раскрепленными трубами из-за плохих погодных условий, поскольку сильно качало судно и левый борт заливало водой.

Однако существовал способ решения этой проблемы. Можно было изменить курс судна так, чтобы принимать волны на правую скулу носа и тем самым минимизировать качку, а раскрепленные трубы при этом оказались бы на подветренном борту за жилыми помещениями и кожухом дымовой трубы. Это создало бы достаточно безопасные условия для работы экипажа на этой закрытой части палубы. Однако хорошо перезакрепить тяжёлые трубные секции в тех погодных условиях было бы чрезвычайно трудно. Поэтому в сложившейся ситуации предпочтительнее было сбросить их за борт, для чего необходимо было вырезать проход в боковых леерах. Можно сделать вывод об отсутствии у капитана основательной морской практики.

После сообщения суперинтенданта о том, что в танк дизельного топлива поступает забортная вода, капитан должен был отреагировать, но никаких действий он не предпринял.

Обосновано было решение капитана не запрашивать помощь сразу после обнаружения ситуации, поскольку он опирался на мнение суперинтенданта, который полагал, что есть шанс дренировать загрязнённое топливо и восстановить мощность ГД. Капитан понимал, что судно дрейфует по ветру, но на ранней стадии не было уверенности, что оно достигнет узкого полуострова в десяти милях к северу раньше, чем будет восстановлен контроль над судном.

В 5 ч 26 мин во время связи капитана с береговой охраной не была четко обозначена экстренность сложившейся ситуации, это было сделано позже, когда стало очевидно, что береговая охрана уже направила на помощь судну.

Старший механик.

Указание старшего механика третьему механику перевести ГД с тяжёлого топлива на дизельное топливо из-за проблем с подогревом было правильным, но он должен был выяснить причину возникшей ситуации. Вероятно, он полагал, что проблема будет решена без его вмешательства. В 2 ч 30 мин старший механик обнаружил, что топливо загрязнено морской водой в отстойном и расходном танках, а также что вахтенная служба с 00 ч 30 мин безуспешно занималась удалением воды из системы подвода топлива к ВПК. Необходимо было установить место проникновения в топливо морской воды, но

вместо этого все усилия были сосредоточены на дренировании морской воды из топлива, и ничего не было предпринято для устранения причин проникновения воды в топливо. Учитывая, что с момента первой попытки вновь зажечь топливный факел в котле прошло три часа и морская вода ещё обнаруживалась в дизельном топливе, было очевидно, что поступление морской воды продолжается. Более того, необходимо было учесть тот факт, что в этот период топливо не закачивалось из танков двойного дна, следовательно, морская вода поступала в другом месте.

Суперинтендант.

Суперинтендант при посещении машинного отделения примерно в 2 ч 00 мин заметил, что морская вода загрязняет топливо, поступающее в паровой котёл. Было решено вызвать в машинное отделение старшего механика, далее они полтора часа с вахтенным механиком пытались запустить котёл, со старшим механиком проверяли дренирование отстойной и расходной цистерн.

Старший механик отвечает за техническую эксплуатацию судна. Суперинтендант является главным техническим специалистом от судовладельца на борту судна, и он должен был проанализировать возникшую ситуацию. Но никто из указанных лиц не пытался разрешить возникшую проблему.

При данных погодных условиях, когда судно захлёстывало водой, никаких действий на палубе не было предпринято. Предполагалось также, что вертикальное пространство между отстойным и расходным танками и палубным настилом было недостаточным, чтобы рассоединить воздушные трубы и прекратить поступление воды с палубы в эти цистерны.

Проверка на однотипном судне показала, что фланцы воздушных труб на болтах крепятся прямо к входам в цистерны и один – прямо к корпусу цистерны. Вертикальное пространство между настилом палубы и верхом цистерн составляет приблизительно один метр. Очевидно, что при необходимости воздушная труба могла быть заглушена в машинном отделении. Проводившееся дренирование топливопроводов и другие промежуточные меры соответствовали уровню подготовки персонала, оставляя как старшему механику, так и суперинтенданту время для анализа ситуации, выработки соответствующего направления действий.

Для старшего механика и суперинтенданта наиболее правильными решениями были бы следующие:

- 1) установить источник попадания забортной воды в отстойную и расходную цистерны;
- 2) при условии, что цистерна двойного дна левого борта не загрязнена морской водой, необходимо было выполнить следующую последовательность действий:

- отсоединить и заглушить вход с палубы воздушных труб на отстойной и расходной цистернах;
- настроить расходную цистерну на сепарирование в режиме закрытого цикла пурификации (расходная цистерна – сепаратор – расходная цистерна);
- полностью дренировать отстойный танк;
- заполнить отстойный танк незагрязнённым дизельным топливом из цистерн двойного дна правого борта;
- возвращаясь к нормальной работе на дизельном топливе, сепарировать его из отстойного танка в расходную цистерну, запас в которой, благодаря сепарированию в режиме закрытой циркуляции, содержит менее загрязнённую водой топливо.

На время этих действий следовало на два часа остановить ГД для экономии дизельного топлива в расходной цистерне, предварительно получив разрешение капитана. Если бы сепарирование в режиме закрытой циркуляции не привело к улучшению качества дизельного топлива в расходной цистерне, то ВДГ бы остановились, судно потеряло бы электроснабжение и все попытки восстановить нормальную работу СЭУ были бы бесполезными.

Однако если бы эти попытки оказались успешными, то ГД мог быть запущен на дизельном топливе за время, достаточное, чтобы предотвратить кораблекрушение. Возможно было запустить ВГК на дизельном топливе, и после разогрева тяжёлого топлива до необходимой температуры перевести ГД на работу на тяжёлом топливе. Нет гарантии, что предложенная последовательность действий могла привести к успешному исходу ситуации, поскольку ряд неизвестных факторов могли бы сыграть свою роль. Но важно отметить следующее: с самого начала возникновения аварийной ситуации необходимо было думать об источнике загрязнения топлива.

Непосредственной причиной аварии было высокое содержание в подаваемом дизельном топливе морской воды, поступающей в цистерны основного запаса через поврежденные воздушные трубы.

В результате анализа ситуации можно определить последовательность событий:

а) останов ГД приблизительно в 4 ч 00 мин 5 января, последовавшая затем потеря электроэнергии из-за серьезного загрязнения водой общей системы подачи топлива как ГД, так и ВДГ;

в) начальное загрязнение произошло после проникновения морской воды в танк основного запаса дизельного топлива левого борта двойного дна. Морская вода попала в танк с верхней палубы через поврежденную кормовую воздушную трубу. Во время последующего пополнения дизельным топливом отстойного танка в 20-24 ч на вечерней вахте 4 января неопределенное количество воды перекачали из танка двойного дна в отстойный танк;

с) повреждение кормовой воздушной трубы танка основного запаса дизельного топлива левого борта двойного дна было вызвано раскреп-

ленными одной или более трубными секциями 4 января во время сильной качки судна;

d) второй источник прямого загрязнения морской водой как отстойного, так и расходного танка происходил, вероятно, с верхней палубы левой стороны через общую воздушную трубу в эти танки. Но невозможно определить, когда вода впервые туда попала этим путем;

e) поломка воздушной трубы на отстойном и расходном танках дизельного топлива произошла, вероятно, из-за повреждения на уровне палубы за счет проникания кусков палубы. Это могло быть вызвано раскрепленными трубными секциями, которые, как известно, были на левом борту палубы. Альтернативно перекатывающиеся волны могли повредить головку воздушных труб либо трубные секции;

f) утром 4 января капитан не предпринял никаких действий, чтобы закрепить трубные секции или сбросить их за борт, или хотя бы контролировать ситуацию. Это серьезное нарушение капитаном инструкций по сохранению непотопляемости судна и безопасности его экипажа;

g) суперинтендант, старший механик, второй механик, капитан не выявили причину загрязнения топлива морской водой, что на ранних стадиях при аналитическом подходе было возможно;

h) ремонт системы управления вспомогательного котла, приведший в результате к снижению давления пара и переводу ГД с тяжелого на легкое топливо, входил в непосредственные обязанности вахты. Отказ зажигания котла произошел из-за загрязнения морской водой питающей линии котла от отстойного танка дизельного топлива;

i) помощь буксира была запрошена капитаном 5 ч 26 мин, примерно через 45 мин после потери хода, это решение капитана было несвоевременным, но верным, так как судну грозила неминуемая посадка на грунт;

j) доступ к якорю со стороны экипажа не был осуществлен из-за риска вследствие экстремальных погодных условий. Однако поручни безопасности имелись на защищенной стороне палубы, и опытный моряк мог получить доступ к якорю;

k) невозможно было высадить людей на баке танкера для отдачи якоря из-за фок-мачты, которая представляла угрозу для безопасной работы вертолета.

Таким образом, можно прийти к выводу, что танкер «Брайер» потерпел кораблекрушение вследствие неправильных действий комсоства, т.е. причиной кораблекрушения стал человеческий фактор:

- 1) неправильная оценка ситуации;
- 2) невыполненная оценка ситуации;
- 3) игнорирование ситуации по причине безответственности и недостаточной подготовки;
- 4) отсутствие соответствующих программ, процедур подготовленности;

- 5) некачественный подбор и недостаточный тренинг экипажа;
- 6) неправильные анализ и оценка ситуации;
- 7) неверные решения, т.е. неправильный выбор необходимых действий;
- 8) неправильная оценка причин катастрофы и их воздействия на развитие ситуации;
- 9) неправильные или несоответствующие действия.

Библиографический список

1. *Amit Ray*. Simulator – Aided Training and Assessment in Reducing Human Error. Proceeding of The 5-th International Conference on Engine Room Simulators., Singapore, 2001.
2. *Bea R., Holdsworth R. and Smith C.* Human and Organizations Factors in Safety of Offshore Platforms. Proceedings of the 1996 International Workshop on Human Factors in Offshore Operations. New Orleans. USA. 1996.
3. *Соболенко А.Н.* Человеческие ошибки – причина аварий судов: Матер. 5-й междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы транспорта Дальнего Востока». Владивосток, 2003.