Н.И. Пчельников

Приборы управления артиллерийским зенитным огнем

Книга вторая

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 030
ББК 92
Н11

Н.И. Пчельников
Н11 Приборы управления артиллерийским зенитным огнем: Книга вторая / Н.И. Пчельников – М.: Книга по Требованию, 2022. – 112 с.

ISBN 978-5-458-30501-3

В книге описаны устройство, работа и методы испытаний ПУАЗО различных систем. Книга предназначается в качестве учебника для слушателей Артиллерийской академии и пособия для начальствующего состава артиллерии Красной Армии.

ISBN 978-5-458-30501-3

дальностей отношением высот, умноженных на соответствующие им котангенсы углов ε и $\varepsilon_у$:

$$\sin \Delta\beta = \frac{d\beta}{dt} \tau_у \cdot \frac{H}{H_у} \cdot \frac{\operatorname{ctg} \varepsilon}{\operatorname{ctg} \varepsilon_у}.$$

Определим теперь упреждение $\Delta\varepsilon$. Для этого плоскость упрежденного угла места $OA_у A_у'$ наложим на плоскость настоящего места цели OAA' (рис. 2). Искомое упреждение $\Delta\varepsilon$ должно равняться разности между упрежденным $\varepsilon_у$ и текущим ε углами места цели. Рис. 2 соответствует отрицательному значению $\Delta\varepsilon$, что мы учтем в дальнейших своих выводах.

Опустим перпендикуляр AN из точки A на направление $OA_у$. Из треугольника OAN будем иметь

$$\sin(-\Delta\varepsilon) = \frac{AN}{OA},$$

или

$$\sin \Delta\varepsilon = -\frac{AN \cdot \sin \varepsilon}{H}, \qquad (3)$$

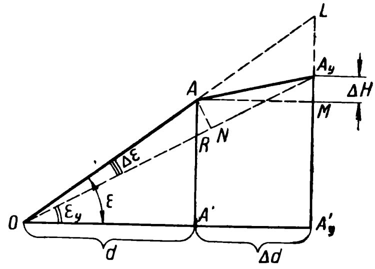

Рис. 2

так как

$$OA = \frac{H}{\sin \varepsilon}.$$

В свою очередь из подобия треугольников OAR и $OA_уL$ получим

$$AR = \frac{(LA_у) \cdot OA}{OL} = \frac{(LA_у) \cdot d}{d_у}$$

и

$$LA_у = (ML - \Delta H) = \Delta d \cdot \operatorname{tg} \varepsilon - \Delta H;$$

отсюда

$$AR = \frac{(\Delta d \cdot \operatorname{tg} \varepsilon - \Delta H) \cdot d}{d_у} = \frac{(\Delta d \cdot \operatorname{tg}\varepsilon - \Delta H) \cdot H \cdot \operatorname{ctg} \varepsilon}{H_у \cdot \operatorname{ctg} \varepsilon_у}.$$

Вместо ΔH поставим его значение $\frac{dH}{dt} \tau_у$:

$$AR = \frac{\left(\Delta d \cdot \operatorname{tg} \varepsilon - \frac{dH}{dt} \tau_у\right) H \cdot \operatorname{ctg} \varepsilon}{H_у \cdot \operatorname{ctg} \varepsilon_у}.$$

Наконец, вместо Δd поставим его значение, выраженное через $\frac{dH}{dt}$, $\frac{d\varepsilon}{dt}$; для этого сначала продиференцируем зависимость $d = H \cdot \operatorname{ctg} \varepsilon$.

Раскрывая скобки, будем иметь:

$$AR = -\frac{\left[\frac{d\varepsilon}{dt}\tau_у H \frac{1}{\sin^2\varepsilon} - 2\,d_у\cdot\sin^2\frac{\Delta\beta}{2}\right]\cdot H\cdot\sin\varepsilon_у}{H_у\cos\varepsilon_у}.$$

Отсюда на основании выражения (3) получим:

$$\sin\Delta\varepsilon = \frac{H}{H_у}\cdot\frac{d\varepsilon}{dt}\tau_у\cdot\frac{\sin\varepsilon_у}{\sin\varepsilon} - 2\cos\varepsilon_у\cdot\sin\varepsilon\cdot\sin^2\frac{\Delta\beta}{2}. \tag{4}$$

Сравнивая это выражение с выражением (59), видим, что в первое из них, в отличие от второго, входит коэфициент $\frac{H}{H_у}$, стоящий при первом члене выражения (4).

Решение задачи встречи в конечном счете сводится к решению системы уравнений:

$$\left.\begin{aligned}
H_у &= H + \frac{dH}{dt}\tau_у \\
\sin\Delta\beta &= \frac{H}{H_у}\cdot\frac{d\beta}{dt}\tau_у\cdot\frac{\operatorname{ctg}\varepsilon}{\operatorname{ctg}\varepsilon_у} \\
\tau_у &= f(\varepsilon_у, H_у) \\
\sin\Delta\varepsilon &= \frac{H}{H_у}\cdot\frac{d\varepsilon}{dt}\tau_у\cdot\frac{\sin\varepsilon_у}{\sin\varepsilon} - 2\cos\varepsilon_у\cdot\sin\varepsilon\cdot\sin^2\frac{\Delta\beta}{2} \\
\varepsilon_у &= \varepsilon + \Delta\varepsilon
\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

Из этих выражений видно, что решение задачи встречи по рассматриваемой сложной гипотезе мало отличается от решения той же задачи по простейшей гипотезе, где высота цели принимается постоянной.

§ 4. Решение задачи встречи по гипотезе о перемещении цели по дуге окружности

(Первый способ)

Эту задачу можно решать различными способами, но мы рассмотрим три способа, имеющие наиболее практическое значение. Первый способ заключается в построении упредительного косоугольного треугольника по некоторому фиктивному курсовому углу. Пусть цель в данный момент находится в точке A, лежащей на криволинейном курсе MM (рис. 3). Угол $OAA_у$, образованный горизонтальной дальностью d и вектором перемещения $\overline{S}_у$, назовем фиктивным курсовым углом и обозначим через q_1.

Упрежденная горизонтальная дальность получится в виде геометрической суммы:

$$\overline{d_у} = \overline{d} + \overline{S_у}.$$

Для получения этой геометрической суммы необходимо знать величину вектора $\bar{S}$ и его направление, характеризующееся курсовым углом q_1. Обозначим радиус дуги MM через r. Из центра C этой дуги проведем два радиуса CA и $CA_у$.

Угол, образованный ими, обозначим через δ. Из прямоугольного треугольника CAK следует:

$$\frac{1}{2} S_у = r \cdot \sin \frac{1}{2} \delta,$$

или

$$S_у = 2r \cdot \sin \frac{1}{2} \delta,$$

угол δ равен отношению дуги $AA_у$, равной $v\tau_у$, к радиусу r, т. е.

$$\delta = \frac{v}{r} \tau_у ,$$

отсюда

$$S_у = 2r \cdot \sin \left(\frac{v}{2r} \tau_у\right).$$

Обозначим отношение $\frac{v}{r}$ через c и преобразуем последнее выражение, умножив и разделив правую его часть на v:

$$S_у = v\tau_у \cdot \frac{\sin \left(\frac{1}{2}\delta\right)}{\frac{1}{2}\delta}.$$

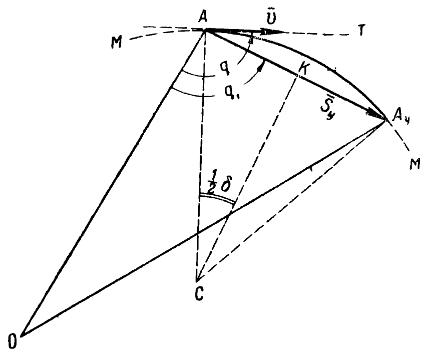

Рис. 3

Отношение $\frac{v}{r}$ представляет собой угловую скорость цели относительно точки C; другими словами, она является скоростью изменения направления радиуса CA. Радиус этот всегда остается перпендикулярным к вектору скорости. Следовательно, скорость изменения направления последнего должна быть тоже $\frac{v}{r}$; но скорость изменения направления вектора $\bar{v}$ есть скорость изменения путевого угла Q. Таким образом:

$$Q_t' = \frac{v}{r} = c.$$

Непрерывным измерением путевого угла Q можно одновременно определять и значение его скорости Q_t'. На практике возможен и другой способ определения этой величины: заданием скорости цели v и радиуса r.

Теперь найдем фиктивный курсовой угол. Из рис. 3 видно, что

$$q_1 = q - (\angle A_y A T),$$

угол $A_y A T$ равен углу $\frac{1}{2}\delta$; отсюда

$$q_1 = q - \frac{1}{2}\delta.$$

В результате решение задачи встречи этим способом сводится к решению системы уравнений:

$$\left.\begin{aligned} S_y &= v\tau_y \cdot \frac{\sin\left(\frac{1}{2}\delta\right)}{\frac{1}{2}\delta} \\ \tau_y &= f(d_y, H) \\ q_1 &= q - \frac{1}{2}\delta \\ \bar{d}_y &= \bar{d} + \bar{S}_y. \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

В частном случае, когда движение прямолинейное, радиус r равен бесконечности.

Тогда

$$\frac{v}{r} = c = 0,$$

$$\delta = 0,$$

$$q_1 = q.$$

Отношение $\dfrac{\sin\left(\frac{1}{2}\delta\right)}{\frac{1}{2}\delta}$ будет в этом случае равно единице, поскольку $\sin\left(\frac{1}{2}\delta\right)$ и $\frac{1}{2}\delta$ являются бесконечно малыми эквивалентами; вектор перемещения вследствие этого получится в виде:

$$S_y = v\tau_y.$$

§ 5. Решение задачи встречи по гипотезе о перемещении цели по дуге окружности

(Второй способ)

Разложим вектор перемещения $\bar{S}_y$ на составляющие S_β и S_d (рис. 4):

$$S_\beta = S_y \cdot \sin q_1;\ S_d = -S_y \cdot \cos q_1.$$

Так как

$$q_1 = q - \frac{1}{2}\delta,$$

то

$$S_\beta = S_у \cdot \sin\left(q - \frac{\delta}{2}\right),$$

$$S_d = -S_у \cdot \cos\left(q - \frac{\delta}{2}\right).$$

Развернем эти выражения:

$$S_\beta = S_у \cdot \sin q \cdot \cos\frac{\delta}{2} - S_у \cdot \cos q \cdot \sin\frac{\delta}{2},$$

$$S_d = -S_у \cdot \cos q \cdot \cos\frac{\delta}{2} - S_у \cdot \sin q \cdot \sin\frac{\delta}{2},$$

или

$$S_\beta = (v \cdot \sin q)\tau_у \cdot \cos\frac{\delta}{2} - (v \cdot \cos q)\tau_у \cdot \sin\frac{\delta}{2},$$

$$S_d = -(v \cdot \cos q)\tau_у \cdot \cos\frac{\delta}{2} - (v \cdot \sin q)\tau_у \cdot \sin\frac{\delta}{2}.$$

Обозначая $v \cdot \sin q$ через v_β и $-v \cdot \cos q$ через v_d, окончательно получим:

$$\left.\begin{aligned} S_\beta &= \left(v_\beta \cdot \cos\frac{\delta}{2} + v_d \cdot \sin\frac{\delta}{2}\right)\tau_у \\ S_d &= \left(v_d \cdot \cos\frac{\delta}{2} - v_\beta \cdot \sin\frac{\delta}{2}\right)\tau_у \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

Сущность решения задачи встречи рассматриваемым способом заключается в геометрическом построении прямоугольного треугольника $OBA_у$ по его катетам

$$OB = d + S_d$$

и

$$BA_у = S_\beta.$$

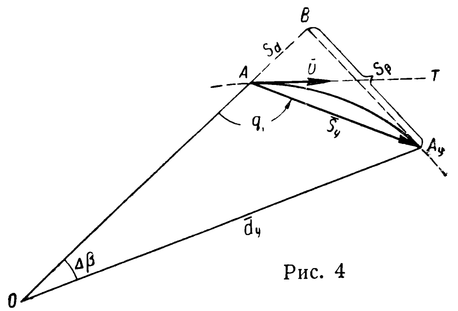

Рис. 4

В частном случае, отвечающем прямолинейному курсу, угол δ равен нулю; выражения (7) примут вид:

$$S_\beta = v_\beta \tau_у;$$

$$S_d = v_d \tau_у,$$

что соответствует ранее рассмотренной гипотезе о прямолинейном движении цели.

§ 6. Решение задачи встречи по гипотезе о перемещении цели по дуге окружности

(Третий способ)

Возьмем прямоугольную систему координат с началом в точке стояния прибора O. Спроектируем вектор перемещения цели на направление осей OX и OY (рис. 5):

$$S_{y_x} = S_y \cdot \cos(180^\circ - q_1 + \beta),$$
$$S_{y_y} = S_y \cdot \sin(180^\circ - q_1 + \beta)$$

или

$$S_{y_x} = -S_y \cdot \cos(q_1 - \beta)$$
$$S_{y_y} = S_y \cdot \sin(q_1 - \beta),$$

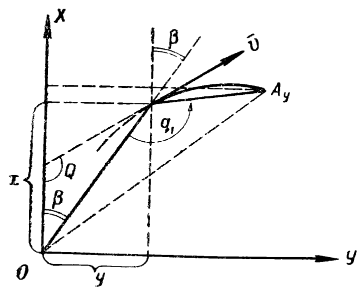

Рис. 5

так как

$$q_1 = q - \frac{\delta}{2} \text{ и } Q + \beta = q,$$

получим

$$q_1 - \beta = q - \frac{\delta}{2} - \beta = Q - \frac{\delta}{2};$$

отсюда

$$S_{y_x} = -v\tau_y \cdot \cos\left(Q - \frac{\delta}{2}\right);$$
$$S_{y_y} = v\tau_y \cdot \sin\left(Q - \frac{\delta}{2}\right).$$

Развернем эти выражения

$$S_{y_x} = \tau_y\left(-v \cdot \cos Q \cdot \cos\frac{\delta}{2} - v \cdot \sin Q \cdot \sin\frac{\delta}{2}\right),$$
$$S_{y_y} = \tau_y\left(v \cdot \sin Q \cdot \cos\frac{\delta}{2} - v \cdot \cos Q \cdot \sin\frac{\delta}{2}\right);$$

так как

$$-v \cdot \cos Q = v_x \text{ и } v \cdot \sin Q = v_y,$$

то окончательно получим:

$$\left.\begin{aligned} S_{y_x} &= \left(v_x \cdot \cos\frac{\delta}{2} - v_y \cdot \sin\frac{\delta}{2}\right)\tau_y \\ S_{y_y} &= \left(v_y \cdot \cos\frac{\delta}{2} + v_x \cdot \sin\frac{\delta}{2}\right)\tau_y \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

Упрежденные координаты x_y и y_y получатся в виде:

$$x_y = x + S_{y_x}; \quad y_y = y + S_{y_y}.$$

В результате решение задачи встречи сведется к решению системы уравнений

$$\left.\begin{aligned} S_{\text{у}_x} &= \left(v_x \cdot \cos \frac{\delta}{2} - v_y \cdot \sin \frac{\delta}{2}\right)\tau_{\text{у}} \\ S_{\text{у}_y} &= \left(v_y \cdot \cos \frac{\delta}{2} + v_x \cdot \sin \frac{\delta}{2}\right)\tau_{\text{у}} \\ x_{\text{у}} &= x + S_{\text{у}_x} \\ y_{\text{у}} &= y + S_{\text{у}_y} \\ \bar{d}_{\text{у}} &= \bar{x}_{\text{у}} + \bar{y}_{\text{у}} \\ \delta &= \frac{v}{r}\,\tau_{\text{у}} \\ \tau_{\text{у}} &= f\,(d_{\text{у}}, H) \end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

В частном случае, при прямолинейном движении цели система эта обращается в ранее полученную нами систему (57)[1]. Сравнивая выражения (8) и (9), видим, что практически они решаются одинаково. Вместе с тем третий способ более сложный, так как требует двухкратного перехода от одной системы координат к другой. Однако третий способ имеет и свои преимущества. По этому способу составляющие скорости не меняются при равномерном и прямолинейном движении цели; кроме того, наиболее просто учитывается смещение прибора относительно батареи. Что касается первого способа, то по своей принципиальной простоте он стоит выше других. Недостатком его является то, что построение косоугольного треугольника практически трудно осуществимо.

§ 7. Общее решение задачи встречи по гипотезе о движении цели с переменными высотой, скоростью и курсом

Принципиально точное решение задачи встречи по этой гипотезе практически неосуществимо. Приближенно же решать задачу встречи можно многими способами; из них наиболее простым является способ, основанный на принципе разложения функции в ряд Тейлора.

Любая координата цели может быть разложена в ряд Тейлора в зависимости от времени.

Разложим упрежденный азимут $\beta_{\text{у}}$ и упрежденный угол места $\varepsilon_{\text{у}}$ в соответствующие ряды

$$\left.\begin{aligned} \beta_{\text{у}} &= \beta + \beta'\tau_{\text{у}} + \beta''\cdot\frac{\tau_{\text{у}}^{\,2}}{1\cdot 2} + \beta'''\cdot\frac{\tau^3}{1\cdot 2\cdot 3} + \dots \\ \varepsilon_{\text{у}} &= \varepsilon + \varepsilon'\tau_{\text{у}} + \varepsilon''\cdot\frac{\tau_{\text{у}}^{\,2}}{1\cdot 2} + \varepsilon'''\cdot\frac{\tau^3}{1\cdot 2\cdot 3} + \dots \end{aligned}\right\} \qquad (10)$$

---

[1] Пчельников Н. И., Приборы управления артиллерийским зенитным огнем, кн. 1.

Производные, начиная с первого порядка до любого высшего, принципиально определить можно. Однако практически определение их бывает настолько не точно, что теряется всякий смысл. Практически с допустимыми погрешностями можно находить производные второго и первого порядка; производные высших порядков можно считать равными нулю.

Исходя из этого, упрежденные координаты в соответствии с выражениями (10) приближенно могут быть получены в виде:

$$\left.\begin{aligned} \beta_{у} &= \beta + \beta'\tau_{у} + \beta'' \cdot \frac{\tau_{у}^{2}}{2} \\ \varepsilon_{у} &= \varepsilon + \varepsilon'\tau_{у} + \varepsilon'' \cdot \frac{\tau_{у}^{2}}{2} \end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

В данном случае в качестве координат мы взяли азимут и угол места. С одинаковым основанием мы могли бы взять другие координаты. Представим себе, что приведенные здесь выражения представляют точное решение; взяв другую систему координат, мы не получим того же решения. Так как система координат не должна сказываться на точности, то в принципе данный способ решения задачи встречи всегда является приближенным; нас же будет интересовать точность определения координат именно этим способом. Коротко остановимся на анализе этого способа решения.

В первую очередь рассмотрим точность решения задачи встречи по гипотезе о прямолинейном равномерном и горизонтальном движении цели. В этом случае производные от азимута по времени (от первого до четвертого порядка), выраженные через курсовой угол q, будут иметь вид:

$$\left.\begin{aligned} \beta' &= \frac{v}{P} \cdot \sin^{2} q \\ \beta'' &= 2\left(\frac{v}{P}\right)^{2} \cdot \sin^{3} q \cdot \cos q \\ \beta''' &= 2\left(\frac{v}{P}\right)^{3} [3 \sin^{4} q \cdot \cos^{2} q - \sin^{6} q] \\ \beta^{IV} &= 24\left(\frac{v}{P}\right)^{4} \sin^{5} q \cdot \cos q \cdot \cos 2q \end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

Анализ этих выражений, взятых соответственно ряду (10), показывает, что наибольшие ошибки в искомом упреждении $\Delta\beta$ лежат в области курсовых углов, близких к 90°, при достаточно большом времени полета. Вместе с тем необходимо отметить, что большие ошибки встречаются редко, а поэтому рассматриваемый принцип решения не лишен практического интереса. Из выражений (12) видно, что во многих случаях третья и четвертая производные компенсируют друг друга; следовательно пренебрежение ими заметно не отразится на точности решения задачи. Этот способ решения можно назвать независимым от гипотез. Как известно, вообще гипотеза формулирует вполне определенный закон движения цели, не зависимый от системы координат. В какой бы системе координат ни решалась задача встречи, результат должен получаться один и тот же, чего нет при данном способе; поэтому при таком способе решения можно взять или любую гипотезу и считать решение приближенным, или гипотезу, в которой говорилось бы: цель за упредительное время движется, так что ускорения ее координат остаются постоянными. При этом обязательно должна быть указана система координат.

Возьмем другое решение, в принципе сходное с рассмотренным, но более точное.

Представим себе, что первые производные от координат по времени непрерывно записываются на графике. Допустим, что такой производной будет скорость изменения азимута β' (рис. 6). Пусть к моменту t_0, отвечающему моменту выстрела, производная β' равна β_0'.

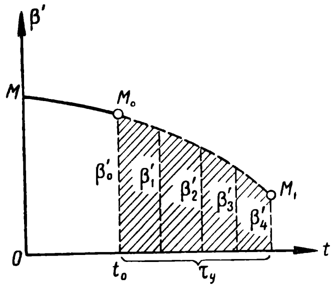

Рис. 6

К этому моменту на графике записан участок кривой β' (MM_0). Предположим, что скорость β' будет и в дальнейшем изменяться по тому же закону. Проэкстраполируем на-глаз кривую до точки M_1, отвечающей времени $t = t_0 + \tau_у$.

Заштрихованная площадь (M_0M_1) может быть выражена в виде:

$$\beta_у - \beta = \Delta\beta = \int\limits_{t_0}^{t_0+\tau_у} \beta' \cdot dt.$$

Интеграл этот может быть определен приближенно по формуле трапеций, если разделить всю площадь на n участков:

$$\Delta\beta = \frac{\tau_у}{n}\left[\frac{1}{2}\beta_0' + \beta_1' + \beta_2' + \ldots + \beta_{n-1}' + \frac{1}{2}\beta_n'\right]. \qquad (13)$$

Практически величина n может быть взята в пределах от одного до четырех. В известном итальянском приборе Буффи, в котором упреждения координат определяются в соответствии с выражением (13), число промежутков n взято равным 4. Формулы упреждений для этого прибора имеют вид:

$$\left.\begin{aligned} \Delta\beta &= \frac{\tau_у}{4}\left(\frac{1}{2}\beta_0' + \beta_1' + \beta_2' + \beta_3' + \frac{1}{2}\beta_4'\right) \\ \Delta\varepsilon &= \frac{\tau_у}{4}\left(\frac{1}{2}\varepsilon_0' + \varepsilon_1' + \varepsilon_2' + \varepsilon_3' + \frac{1}{2}\varepsilon_4'\right) \end{aligned}\right\}. \qquad (14)$$

Этот способ решения нужно признать более точным в сравнении с ранее рассмотренным, в чем нетрудно убедиться, проанализировав оба способа для одинаковых условий стрельбы.

Глава II

ПУАЗО СПЕРРИ Т-8

§ 8. Общие сведения

В основание устройства ПУАЗО Сперри Т-8 положена гипотеза о прямолинейном равномерном и горизонтальном движении цели за упредительное время. Этот прибор отличается от предшествовавших ему образцов Сперри Т-4 и Сперри Т-6 своей простотой. В нем не учитываются никакие поправки, за исключением приближенных поправок на деривацию и ветер. Кроме того, прибор имеет более совершенные по конструкции отдельные счетно-решающие механизмы. Наконец, в целях экономии обслуживающего персонала в прибор введены следящие электрические устройства. Благодаря этому прибор могут обслужить пять номеров, в то время как для Т-6 требуется десять номеров.

Упрощение конструкции позволило уменьшить габариты и вес прибора; вместе с тумбой он весит около полутонны.

Задача встречи решается в приборе геометрическим методом в прямоугольной системе координат.

При наблюдении за целью с помощью визиров в прибор непрерывно вводятся азимут β и угол места ε. Высота передается с высотомера. В дальнейшем эти координаты преобразуются в прямоугольные (x, y, z).

§ 9. Выработка текущих координат

(*Приложение 1*)

Действием на маховик *1* прибор наводят по азимуту. Введенный азимут β поступает в координатор K_1 и диференциалы *15* и *16*.

Действием на маховик *3* прибор наводят по углу места ε, поступающему на шкалу совмещения *7*.

Третья координата — высота цели H — поступает с помощью электрической синхронной передачи на „принимающий“ *19* и шкалу *18*. По этой шкале маховиком *8* в прибор вводят высоту цели H; корректура текущей высоты вводится маховиком *6*. Высота поступает на коноид горизонтальной дальности K_3 и на балистические коноиды K_4 и K_5. Коноид K_3 служит для выработки горизонтальной дальности d по высоте H и углу места ε соответственно зависимости:

$$d = H \cdot \operatorname{ctg} \varepsilon.$$