

Министерство образования Украины  
Киевский институт инженеров гражданской авиации

На правах рукописи

Чжао Хун Дань

Разработка аналитико-статистической модели прогнозирования  
риска опасных сближений и столкновений воздушных судов на  
пересекающихся маршрутах

Специальность 05.13.01 - Управление в технических  
системах

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев 1994



Работа выполнена в Киевском институте инженеров  
гражданской авиации

Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор Демьянчук В. С.

Официальные оппоненты - заслуженный деятель науки  
и техники Украины,  
доктор технических наук,  
профессор Игнатов В. А.  
- кандидат технических наук,  
доцент Барвинский Л. Л.

Ведущее предприятие указано в решении совета

Защита состоится " 11 " 05 1994 г. в \_\_\_\_\_  
часов на заседании специализированного совета К 072.04.  
02 в Киевском институте инженеров гражданской авиации  
по адресу: 252058, Киев-58, проспект Космонавта Комарова,  
1, КИИГА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КИИГА.  
Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1994 года.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
К 072.04.02  
кандидат технических наук,  
доцент

Баскакова А. Г.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. По данным ИКАО, в 1969--1974г 20% авиакатастроф случилось на этапе взлета, 50% на этапе посадки, 30% на маршруте. Более того, с увеличением интенсивности использования воздушного пространства, доля авиакатастроф на маршруте увеличится.

В настоящее время, особенно в Западной Европе, имеется большое число пересечений маршрутов. Аналогичная ситуация складывается во многих развивающихся странах, в том числе и в Китае. Безусловно, что полеты на пересекающихся маршрутах опаснее, чем на параллельных.

ИКАО в 1972 учредила "группу экспертов по рассмотрению общей концепции эшелонирования (RGCSF)", задачей которой является разработка методик прогнозирования и вычисления риска столкновений. В настоящее время разработаны методики прогнозирования и вычисления риска столкновений самолетов, находящихся на параллельных маршрутах. Однако, методика прогнозирования и вычисления риска столкновений на пересекающихся маршрутах пока не разработана. Такая методика имеет важное значение при организации воздушного движения службой УВД и его планировании, построении рациональной структуры воздушного пространства (ВП) и сети воздушных трасс (ВТ).

Общая концепция исследования и промежуточные результаты работы докладывались в Бюро гражданской авиации Китая и получили одобрение.

Цель работы. Разработка и исследование путей повышения безопасности воздушного движения в зонах пересечения маршрутов.

Методы исследований. Исследования проводятся на базе современных методов теории вероятностей с использованием вычислительной техники для выполнения расчета и анализа риска столкновений.

Научная новизна работы. В диссертации впервые разработаны и проанализированы аналитико-статистические модели прогнозирования риска опасных сближений и столкновений ВС на пересекающихся маршрутах.

Практическая ценность. Использование результатов работы позволяет более точно прогнозировать безопасность полетов ВС, более рационально решать задачи организации воздушного пространства и воздушного движения, создания рациональной сети воздушных трасс. Все

это будет способствовать повышению безопасности полетов ВС.

Реализация работы. Полученные в работе результаты и конкретные рекомендации по организации воздушного движения, повышению его безопасности использованы в научных разработках кафедры АСУВД КИИГА, переданы для использования в Бюро гражданской авиации Китая, при организации воздушного движения и его планирования.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались в Китайском институте гражданской авиации (г. Тянь Цин), докладывались в Бюро гражданской авиации Китая (г. Пекин), на научно-технических семинарах КИИГА.

Публикация. По материалам исследований, выполненных в процессе работы над диссертацией, опубликовано 3 печатных работы [1, 2, 3].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, приложения, списка литературы из 108 наименований, изложена на 161 странице машинописного текста и включает 81 рисунок и 5 таблиц.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные аналитико-статистические модели прогнозирования риска опасных сближений и столкновений ВС на пересекающихся маршрутах.

2. Результаты анализа риска опасных сближений и столкновений ВС в соответствии с разработанными моделями.

3. Рекомендации по повышению безопасности ВД за счет построения рациональной структуры ВП и сети ВТ.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Разработаны и исследованы две модели для расчета риска столкновений на пересекающихся маршрутах. По предложениям ИКАО, одним из критериев безопасности полета ВС служит риск столкновения или ожидаемое число авиационных происшествий за летный час (N).

1) Постановка задачи:

В диссертации разрабатываются и анализируются аналитико-статистические модели прогнозирования риска столкновений ВС на пересекающихся маршрутах, которые могут использоваться при организации воздушного движения и его планировании, построении рациональной

структуры воздушного пространства и сети воздушных трасс.

2) Принятые допущения:

- воздушное движение осуществляется с большой плотностью, в основном в горизонтальном полете;
- в полете используются маяки VOR/DME; радиолокационный контроль отсутствует;
- используется прямая речевая связь пилот-диспетчер; пилот и диспетчер не могут оказывать корректирующего воздействия на местоположения конфликтующих ВС;
- форма воздушного судна представляется в виде цилиндра: его высота  $h$ , диаметр основания  $D$ ;
- длина каждой трассы  $2L$ ;
- риск столкновений ВС на пересекающихся маршрутах определяется без учета нарушения продольного эшелонирования ВС на каждой из трасс;
- имеет место независимость выдерживания высоты и линии пути;
- имеет место независимость ошибок выдерживания высоты и линии пути каждым из ВС;
- имеет место независимость продольных положений двух ВС;
- имеет место независимость бокового отклонения  $Y$  и скорости бокового отклонения  $\dot{Y}$ , хотя они связаны. Такое допущение используется и для соотношений между  $X$  и  $\dot{X}$ ,  $V_y$  и  $\dot{Y}$ ,  $V_x$  и  $\dot{X}$ ;
- отсутствует корреляция между относительными скоростями ВС, т.е. между  $|\dot{X}|$ ,  $|\dot{Y}|$ ,  $|\dot{Z}|$ , между координатами  $X, Y, Z$  и  $|\dot{Z}|$ , между  $|\dot{X}|$  и  $Z$ , между  $|\dot{Y}|$  и  $Z$ , между  $X(X')$  и  $Y(Y')$ ;

Во введении показаны актуальность, цель исследования, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе выбрана система координат для учета положения ВС и скорости ВС по правилам, принятым в Циркуляре 120-АН/89/2, 1976.

В выбранной системе координат ситуации движения ВС, представленные на рис 1, а и 1, б, называются "одним и тем же направлением" полета, а на остальных - "встречным направлением" полета.

Главный принцип составления первой модели состоит в том, что ВС столкнутся, если одновременно выполняются следующие условия:

- вертикальное расстояние между ВС меньше или равно  $\lambda$  (в этом случае происходит перекрытие в направлении Z);
- боковое расстояние между ВС меньше или равно D (происходит перекрытие в направлении Y);
- продольное расстояние между ВС меньше или равно D (происходит перекрытие в направлении X);

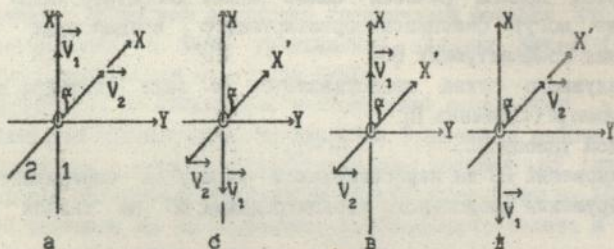


Рис 1. Ситуации полета ВС

### 1.1. Первая форма первой модели

Риск столкновений ВС определяется выражениями:

$$N = \frac{P_z |\dot{Z}|}{2\lambda_z} P_x P_y + N_x P_x P_z + N_y P_y P_z \quad (1)$$

Уравнения боковой скорости отклонения  $V_y$  и продольной скорости  $V_x$  имеют вид (рис 2):



$$V_y = V'_y \cos \alpha + V'_x \sin \alpha \quad (2)$$

$$V_x = V'_x \cos \alpha - V'_y \sin \alpha \quad (3)$$

$$V_x'^2 + V_y'^2 = V^2 \quad (4)$$

$$V_x^2 + V_y^2 = V^2 \quad (5)$$

$$X_1^2 + Y_1^2 = V^2 \quad (6)$$

Рис 2

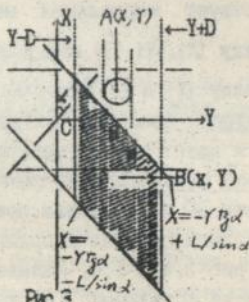


Рис 3

Принятые обозначения приведены в списке обозначений на стр. 17. Из рис 3, имеем:

$$P_Y(\alpha \neq 90^\circ) = 2D \int_{-D}^{+D} f_1(Y) \left[ \int_{Y-D}^{Y+D} dn \right] \frac{-Y \operatorname{tg} \alpha + L / \cos \alpha}{-Y \operatorname{tg} \alpha - L / \cos \alpha} f_2(n \cos \alpha - m \sin \alpha) dm dY \quad (7)$$

$$P_Y(\alpha = 90^\circ) = 4D^2 \int_{-L}^L f_1(Y) dY \quad (8)$$

Выражение для  $P_X$  аналогично выражению для  $P_Y$ :

$$P_X(\alpha \neq 90^\circ) = \frac{2D}{2L} \int_{-L}^L dX \int_{X-D}^{X+D} dm \int_{-Y \operatorname{tg} \alpha + L / \sin \alpha}^{-Y \operatorname{tg} \alpha - L / \sin \alpha} f_2(n \cos \alpha - m \sin \alpha) dn \quad (9)$$

$$P_X(\alpha = 90^\circ) = (2D)^2 \int_{-L}^L f_1(Y) dY \int_{-L}^L f_2(-m) dm \quad (10)$$

Вычисление  $N_Y$  осуществляется по формуле:

$$N_Y = \frac{1}{2L} \int f_1(Y) dY \int |\dot{Y}|(X, Y) f_2(Y \cos \alpha - X \sin \alpha) dX,$$

где  $|\dot{Y}|(X, Y) = [q_1(Y_1) dY_1] [q_2(V'_Y) |\dot{Y}|(X, Y) dV'_Y]$ ,

$$|\dot{Y}|(X, Y) = |V_Y - Y_1| \quad (11)$$

В ситуации, показанной на рис 1, б и нахождении ВС линии пути 2 в зоне CIR (рис 4), принцип составления  $N_{XY}$  состоит в следующем ( $\theta_1$  - угол отклонения от линии пути 1;  $\theta_2$  - угол отклонения от линии пути 2.):

Допускаем, что ВС на линии пути 2 находится в точке  $A(X, Y)$ , которая принадлежит зоне CIR. Если ВС на линии пути 1 находится в точке  $B(x, Y)$ , то они находятся в состоянии  $Y$ -перекрытия.

Из рис 4 очевидно, что ВС на линии пути 1 может отклоняться по линии UB до точки В или по линии ТВ до точки В (при этом,  $\theta_1 = 90^\circ$ ). Итак, мы имеем:

$$Y_1 \in \left( V \sin \left( \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{Y}{L+X} \right) \right), V \right) \quad (12)$$

Следовательно, ВС на линии пути 2 может отклоняться до точки А по линии FA или QA (при этом  $\theta_2 = 90^\circ$ ). Итак имеем:

$$V'_Y \in \left( V \sin(\theta_2^*), V \right) \quad (13)$$

Здесь  $\theta_2^*$  может быть получено из  $\triangle AOF$ :

$$\theta_2^* = \cos^{-1} \left( \frac{(X-L \cos(\alpha))^2 + (Y-L \sin(\alpha))^2 + L^2 - (Y^2 + X^2)}{2L \sqrt{(X-L \cos(\alpha))^2 + (Y-L \sin(\alpha))^2}} \right) \quad (14)$$

Пусть 
$$\theta_2^+ (X, Y) = \cos^{-1} \left( \frac{(X+L \cos \alpha)^2 + (Y+L \sin \alpha)^2 + L^2 - (X^2 + Y^2)}{2L \sqrt{(X+L \cos \alpha)^2 + (Y+L \sin \alpha)^2}} \right) \quad (15)$$

$$\theta_2^- (X, Y) = \cos^{-1} \left( \frac{(X-L \cos \alpha)^2 + (Y-L \sin \alpha)^2 + L^2 - (X^2 + Y^2)}{2L \sqrt{(X-L \cos \alpha)^2 + (Y-L \sin \alpha)^2}} \right) \quad (16)$$

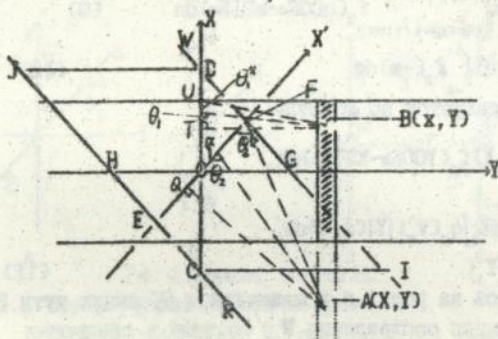


Рис 4

Итак мы имеем:

$$N_Y(CIR) = \frac{1}{2L} \int_{-m}^{-L/\cos \alpha} dX \int_{-X \operatorname{ctg} \alpha + L/\sin \alpha}^{-X \operatorname{ctg} \alpha + L/\sin \alpha} f_2(Y \cos \alpha - X \sin \alpha) dY \int_{Y-D}^{Y+D} f_1(n) dn \int_{-1}^1 \left( \int_{v \sin(\operatorname{tg}^{-1}(\frac{Y}{L-m}))}^v q_1(Y_1) \chi_{Y_1} \int_{v \sin \theta_2^+(X, Y)}^v q_2(V') \left| V' \cos \alpha - \sqrt{V'^2 - V_Y'^2} \sin \alpha - Y_1 \right| \right) dm \quad (17)$$

$N_Y$  в других зонах определяется по аналогии с  $N_Y(CIR)$ .

$$N_Y(\alpha \neq 90^\circ) = N_Y(JDW) + N_Y(JDHD) + N_Y(DOF) + N_Y(FOG) + N_Y(GOCI) + N_Y(CIR) + N_Y(CEO) + N_Y(EHO) \quad (18)$$

При  $\alpha = 90^\circ$ , принцип составления  $N_Y$  тот же самый.

В ситуациях, показанных на рис 1, б и в и д, значение  $N_Y$  определяется по аналогии с выражениями для  $N_Y$  при ситуации, показанной на рис 1, а.

Значения  $N_X$  определяются по аналогии с выражениями для  $N_Y$ .

$$P_z = P_z(0) = 0.25 \quad (19)$$

$$|z|=1(\text{узел})$$

(20)

1.2 Вторая форма первой модели имеет следующий вид:

$$N=P_x P_y P_z \left( \frac{|\dot{X}|}{2D} + \frac{|\dot{Y}|}{2D} + \frac{|\dot{Z}|}{2z} \right) \quad (21)$$

В принятом условии (24),  $|\dot{X}|$ ,  $|\dot{Y}|$ ,  $|\dot{Z}|$  не связаны с соответствующими координатами  $X, Y, Z$ . При этом:

$$|\dot{Y}| = \int_{-V}^V q_1(Y_1) dY_1 \int_{-V}^V q_2(V'_1) |\dot{Y}| dV'_1$$

$$\text{где } |\dot{Y}| = |V'_1 \cos \alpha + \sqrt{V^2 - V'^2} \sin \alpha - Y_1| \quad (22)$$

При ситуации, показанной на рис 1, а и б,

$$|\dot{X}| = \int_{-V}^V q_1(Y_1) dY_1 \int_{-V}^V q_2(V'_1) |\sqrt{V^2 - V'^2} \cos \alpha - V'_1 \sin \alpha - \sqrt{V^2 - Y_1^2}| dV'_1 \quad (23)$$

При ситуации, показанной на рис 1, в и г,

$$|\dot{X}| = \int_{-V}^V q_1(Y_1) dY_1 \int_{-V}^V q_2(V'_1) |\sqrt{V^2 - V'^2} \cos \alpha + V'_1 \sin \alpha + \sqrt{V^2 - Y_1^2}| dV'_1 \quad (24)$$

Во второй главе разработана вторая модель оценки риска столкновений. Главный принцип составления второй модели состоит в том, что ВС столкнутся, если одновременно выполняются следующие условия:

- вертикальное расстояние между ВС меньше или равно  $z$ ;
- расстояние между ВС в горизонтальной плоскости  $(X, Y)$  меньше или равно  $D$ ; в этом случае, происходит перекрытие в плоскости  $(X, Y)$ ; иными словами, допустим, что ВС на линии пути 1 находится в точке  $A(X, Y)$ , если ВС на линии пути 2 находится в круге, центрированной в точке  $A(X, Y)$  и с радиусом  $D$ , то происходит перекрытие в плоскости  $(X, Y)$  (рис 5).

2.1 Первая форма второй модели имеет следующий вид:

$$N=P_z (N_{xy} + P_{xy} \frac{|\dot{Z}|}{2z}) \quad (25)$$

Площадь перекрытия в плоскости  $(X, Y)$  представлена на рис 5.

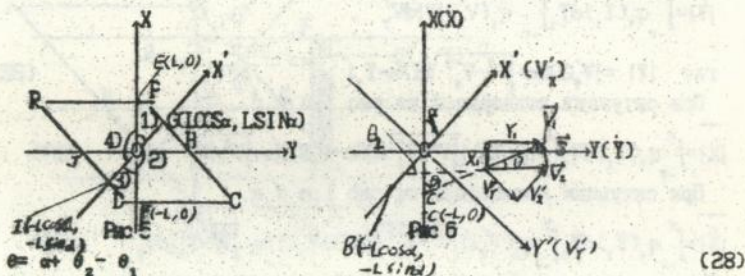
$$P_{XY}(\alpha=90^\circ) = \frac{2Dn}{2L} \int_{-L}^L dx \int_{x \cos \alpha - L / \sin \alpha}^{x \cos \alpha + L / \sin \alpha} f_1(Y) dy \int_{x-D}^{x+D} dn \int_{y - \sqrt{D^2 - (m-x)^2}}^{y + \sqrt{D^2 - (m-x)^2}} f_2(\dots) \quad (26)$$

$$n \cos \alpha - m \sin \alpha \quad (26)$$

$$P_{XY}(\alpha=90^\circ) = \frac{2Dn}{2L} \int_{-L}^L f_2(-X) dx \int_{-L}^L \left( \int_{Y-D}^{Y+D} 2 \sqrt{D^2 - (n-Y)^2} f_1(n) dn \right) dY \quad (27)$$

Составление |S|

В ситуации, показанной на рис 1, а, в секторе 2) (рис 5 и 6):



$$\theta_1 = \sin^{-1} \left( \frac{Y_1}{V} \right) \quad (Y_1 > 0) \quad (29)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{V'_Y}{V} \right) \quad (V'_Y < 0) \quad (30)$$

Итак получаем:

$$|S|(X, Y) = V \sqrt{2(1 - \cos \theta)} = V \sqrt{2 \left( 1 - \cos \left( \alpha + \sin^{-1} \left( \frac{V'_Y}{V} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{Y_1}{V} \right) \right) \right)} \quad (31)$$

|S|(X, Y) имеет одинаковые выражения в других секторах. Аналогично, в ситуации, показанной на рис 1, б,

$$|S|(X, Y) = V \sqrt{2 \left( 1 - \cos \left( \alpha + \sin^{-1} \left( \frac{Y_1}{V} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{V'_Y}{V} \right) \right) \right)} \quad (32)$$

В ситуации, показанной на рис 1, в,

$$|S|(X, Y) = V \sqrt{2 \left[ 1 + \cos \left( \alpha - \sin^{-1} \left( \frac{Y_1}{V} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{V'_Y}{V} \right) \right) \right]} \quad (33)$$

В ситуации, показанной на рис 1, д,

$$|S|(X, Y) = V \sqrt{2 \left[ 1 + \cos \left( \alpha + \sin^{-1} \left( \frac{Y_1}{V} \right) + \sin^{-1} \left( \frac{V'_Y}{V} \right) \right) \right]} \quad (34)$$

Вычисление  $N_{XY}$  осуществляется по формуле:

$$N_{XY} = \frac{1}{2L} \int \int |S|(X, Y) f_1(Y) f_2(Y \cos \alpha - X \sin \alpha) dX dY, \quad (35)$$

где  $|S|(X, Y) = [q_1(Y_1) dY_1] [q_2(V'_Y) |S|(X, Y) dV'_Y]$

Принцип составления пределов  $Y_1$  и  $V'_Y$  похож на принцип составления пределов  $Y_1$  и  $V'_Y$  в 1.1. В ситуации, показанной на рис 1, а,

$$N_{XY}(1) = \frac{1}{2L} \left( \int_0^{L \cos \alpha} dX \int_0^{X \tan \alpha} f_1(Y) f_2(Y \cos \alpha - X \sin \alpha) dY + \int_{L \cos \alpha}^L dX \int_{X \tan \alpha - L \sin \alpha}^X f_1(Y) f_2(Y \cos \alpha - X \sin \alpha) dY \right) \int_{-V}^V q_2(V'_Y) |S|(X, Y) dV'_Y \quad (36)$$

$N_{XY}$  в других секторах определяется по аналогии с  $N_{XY}(1)$ .

$$|S|(X, Y) = (30) \quad (37)$$

$$N_{XY}(\alpha \neq 90^\circ) = \sum_{i=1}^4 N_{XY}(i) \quad (38)$$

В ситуации, показанной на рис 1, б и в и д,  $N_{XY}(\alpha \neq 90^\circ)$  вычисляется по аналогии с (38). Нетрудно доказать, что

$$N_{XY}(\alpha \neq 90^\circ, \text{ситуация в рис 1, а}) = N_{XY}(\alpha \neq 90^\circ, \text{ситуация в рис 1, б}) \quad (39)$$

$$N_{XY}(\alpha \neq 90^\circ, \text{ситуация в рис 1, в}) = N_{XY}(\alpha \neq 90^\circ, \text{ситуация в рис 1, д}) \quad (40)$$

$$N_{XY}(\alpha = 90^\circ) = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L dX \int_0^L f_1(Y) f_2(-X) dY \int_{-V}^V q_2(V'_Y) |S|(X, Y) dV'_Y$$

$$dV'_Y + \frac{nD^2}{2L} \int_{-L}^0 dX \int_{-L}^0 f_1(Y) f_2(-X) dY \int_{-v}^v q_1(Y_1) dY_1 \int_{-v \sin(\lg^{-1}(\frac{Y}{L+X}))}^v q_2(V'_Y) |S|(X, Y) dV'_Y$$

$$+ \frac{nD^2}{2L} \int_0^L dX \int_{-L}^0 f_1(Y) f_2(-X) dY \int_{-v}^v q_1(Y_1) dY_1 \int_{-v \sin(\lg^{-1}(\frac{Y}{L+X}))}^v q_2(V'_Y) |S|(X, Y) dV'_Y, \text{ где}$$

$$|S|(X, Y) = V \sqrt{2 \left( 1 + \cos \left( 90^\circ + \sin^{-1} \left( \frac{Y_1}{V} \right) + \sin^{-1} \left( \frac{V'_Y}{V} \right) \right) \right)} \quad (41)$$

В процессе вычисления  $N_{XY}$  было сделано упрощение:

$$\int_{x=0}^{x=b} dx \int_{y=-\sqrt{b^2 - (m-x)^2}}^{y=\sqrt{b^2 - (m-x)^2}} f_2(n \cos \alpha - m \sin \alpha) dn \approx \pi D^2 f_2(Y \cos \alpha - X \sin \alpha) \quad (42)$$

## 2.2 Вторая форма второй модели

Предполагается, что  $|S|$ ,  $|X|$ ,  $|Y|$ ,  $|Z|$  не связаны с координатами  $X, Y, Z$ . В этом случае получено:

$$N_{XY} = P_{XY} \frac{\overline{|S|}}{2\pi} \quad (43)$$

$$N = P_{XY} P_Z \left( \frac{\overline{|Z|}}{2z} + \frac{\overline{|S|}}{2\pi} \right) \quad (44)$$

В ситуации, показанной на рис 1, а и б,

$$\overline{|S|} = \int_{-v}^v q_1(Y_1) dY_1 \int_{-v}^v q_2(V'_Y) V \text{SORT} \left( 2 - 2 \cos \left( \alpha + \sin^{-1} \left( \frac{V'_Y}{V} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{Y_1}{V} \right) \right) \right) dV'_Y \quad (45)$$

В ситуации, показанной на рис 1, в и д,

$$\overline{|S|} = \int_{-v}^v q_1(Y_1) dY_1 \int_{-v}^v q_2(V'_Y) V \text{SORT} \left( 2 + 2 \cos \left( \alpha - \sin^{-1} \left( \frac{Y_1}{V} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{V'_Y}{V} \right) \right) \right) dV'_Y \quad (46)$$

В третьей главе представлены результаты анализа, которые получены из выражений для риска столкновений ВС. В этих выражениях использован нормальный закон распределения бокового отклонения ВС от заданной трассы полета, параметры которого взяты из Циркуляра 120-AN/89/2, 1976.

Группа данных I:

$$f_1(Y) = f_2(Y') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 1.4} \exp\left(-\frac{(A-0.3)^2}{2(1.4)^2}\right), \text{ где } A=Y \text{ или } Y' \quad (47)$$

Группа данных II:

$$f_1(Y) = \exp\left(-\frac{(Y-0.3)^2}{2(1.9)^2}\right) / (1.9 \sqrt{2\pi}) \quad (48)$$

$$f_2(Y') = \exp\left(-\frac{(Y'+0.1)^2}{2(1.5)^2}\right) / (1.5 \sqrt{2\pi}) \quad (49)$$

В расчете использован нормальный закон распределения скорости бокового отклонения, где  $\sigma=41.653$  (узлов) взят из ICAO DOC 9536, RGCSР/6, Volume 1:

$$q_1(Y_1) = q_2(V'_Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left(-\frac{B^2}{2\sigma^2}\right), \text{ где } B=Y_1 \text{ или } V'_Y \quad (50)$$

В соответствии с данными расчетов по формулам (23), (24) для  $|\dot{X}|$ , (22) для  $|\dot{Y}|$ , (7), (8) для  $P_Y$ , (9), (10) для  $P_X$ , (26), (27) для  $P_{XY}$ , (33)–(42) для  $N_{XY}$ , (45), (46) для  $|S|$ , (21), (25), (44) для  $N(\alpha)$  и  $N(\text{УПТ})$ , получены зависимости, изображенные на рис 7-15.

Таблица 1

$N \setminus \alpha$	$30^\circ$	$55^\circ$	$60^\circ$	$65^\circ$	$70^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$
$N_1(\text{I})$	$1.56 \cdot 10^{-3}$		$1.15 \cdot 10^{-3}$			$1.31 \cdot 10^{-3}$	$1.80 \cdot 10^{-3}$	$3.77 \cdot 10^{-3}$
$N_2(\text{II})$	$1.46 \cdot 10^{-2}$	$9.87 \cdot 10^{-3}$	$9.56 \cdot 10^{-3}$	$9.49 \cdot 10^{-3}$	$9.65 \cdot 10^{-3}$	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.64 \cdot 10^{-2}$	$5.51 \cdot 10^{-2}$
$N'_2(\text{II})$	$1.29 \cdot 10^{-2}$		$7.98 \cdot 10^{-3}$			$9.44 \cdot 10^{-3}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	$4.66 \cdot 10^{-2}$
$N \setminus \alpha$	$5^\circ$	$10^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$	
$N(\text{I})$	0.10	$4.08 \cdot 10^{-2}$	$4.29 \cdot 10^{-2}$	$5.30 \cdot 10^{-2}$	$6.85 \cdot 10^{-2}$	$9.17 \cdot 10^{-2}$	0.15	

Общее число риска столкновений:

$$N(\text{УПТ}=\alpha) = \beta N(\text{УВПС}=\alpha) + (1-\beta) N(\text{УВПС}=\pi-\alpha) \quad (51)$$

где  $\alpha \in (0, \pi/2)$ ,  $\beta$ -доля появления ситуации "одного и того же направление"; УВПС - угол между векторами путевой скорости, УПТ -

угол пересечения трасс. При  $\beta=0.5$ , получим таблицу 2.

Зависимость риска столкновений от путевой скорости  $V$  по данным таблицы 3 приведена на рис 16.

Таблица 2

	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$
$N_1(\text{II}, \text{УПТ})$	$1.08 \times 10^{-2}$	$4.76 \times 10^{-3}$	$4.17 \times 10^{-3}$
$N_2(\text{II}, \text{УПТ})$	0.34	0.13	0.11
$N_2'(\text{II}, \text{УПТ})$	0.29	0.10	0.09
$N(\text{I}, \text{УПТ})$	0.20	0.15	0.14

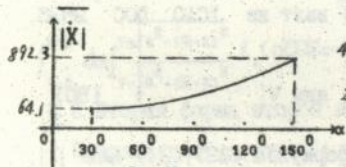


Рис 7

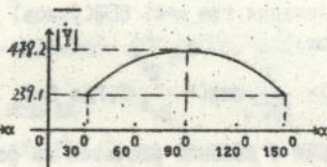


Рис 8

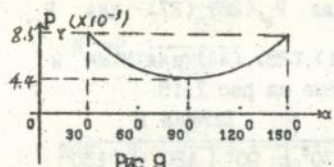


Рис 9

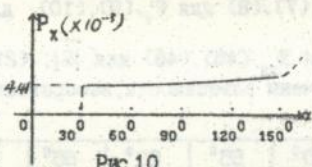


Рис 10

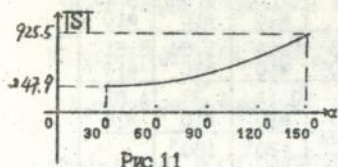


Рис 11

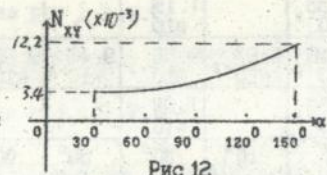


Рис 12

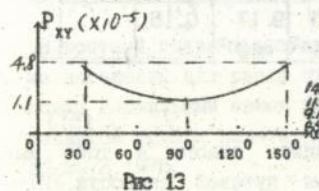


Рис 13

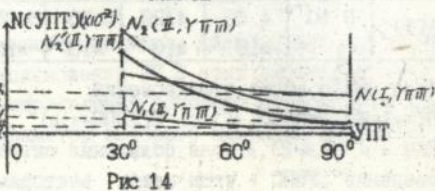


Рис 14

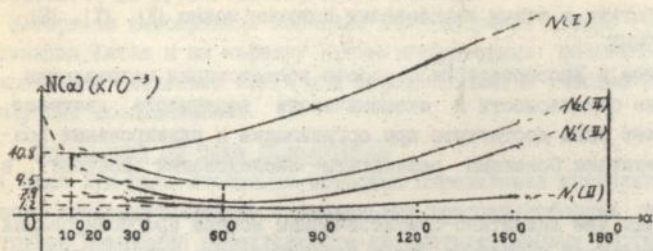


Рис 15

Таблица 3

$N \setminus V$	300	350	400	450	480	500
$\alpha=90^\circ$	422.12	493.12	546.06	634.92	677.53	705.76
ISI						
N	$6.97 \cdot 10^{-3}$	$8.14 \cdot 10^{-3}$	$9.21 \cdot 10^{-3}$	$1.07 \cdot 10^{-2}$	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.19 \cdot 10^{-2}$
$\alpha=120^\circ$	516.98	603.95	690.81	777.62	829.80	864.38
ISI						
N	$1.03 \cdot 10^{-2}$	$1.20 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	$1.54 \cdot 10^{-2}$	$1.64 \cdot 10^{-2}$	$1.71 \cdot 10^{-2}$
$\alpha=150^\circ$	576.62	673.62	770.50	867.32	925.52	964.05
ISI						
N	$3.40 \cdot 10^{-2}$	$3.96 \cdot 10^{-2}$	$4.51 \cdot 10^{-2}$	$5.07 \cdot 10^{-2}$	$5.51 \cdot 10^{-2}$	$5.63 \cdot 10^{-2}$

Вышеприведенные результаты были получены по (34), при постоянных  $D, \lambda_2$ , первой группе данных, при  $V_1 = V_2 = V$ .

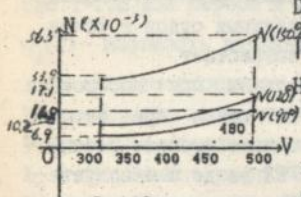


Рис 16

ISI получено по (36).

Надо заметить, что при  $V_1 \neq V_2$ , значение N можно получить тоже по этим моделям. При этом, необходимо воспользоваться выражениями:

$$X_1 = \pm \sqrt{V_1^2 - Y_1^2} \tag{52}$$

$$V_Y = V'_Y \cos \alpha \pm \sqrt{V_2^2 - V'^2_Y} \sin \alpha \tag{53}$$

$$V_X = \pm \sqrt{V_2^2 - V'^2_Y} \cos \alpha - V'_Y \sin \alpha \tag{54}$$

В соответствии с этими выражениями получим новые  $|\dot{X}|$ ,  $|\dot{Y}|$ ,  $|S|$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в диссертационной работе исследования направлены на повышение безопасности и экономичности воздушного движения, которое может быть достигнуто при организации и планировании воздушного движения. Основные результаты исследований состоят в следующем:

1. Разработаны две аналитико-статистические модели прогнозирования риска столкновений воздушных судов, находящихся на пересекающихся маршрутах. Для каждой модели получены необходимые для расчетов точные и приближенные оценки, соответственно сложные и более простые.

2. Проанализированы зависимости риска столкновений воздушных судов от ряда важнейших параметров: их геометрических размеров, путевой скорости, угла пересечения маршрутов, времени полета, и др.

Показано, например, что минимум риска столкновений достигается при угле между векторами путевых скоростей в пределах  $60^\circ - 65^\circ$ . Увеличение путевых скоростей приводит к увеличению риска столкновений. Более безопасными для воздушных судов являются полеты в "одном и том же направлении", чем полеты на "встречных направлениях". Увеличение интенсивности полетов приводит к увеличению риска столкновений. Увеличение длины трассы (или времени полета на пересекающихся маршрутах) приводит к увеличению риска столкновений. Эта зависимость по мере приближения воздушных судов к точке пересечения трасс риск столкновений резко возрастает.

3. Разработанные модели могут быть использованы при построении рациональной структуры ВП, создании сети ВТ, а также при анализе уже сложившейся структуры ВП и ВТ с целью оценки уровня безопасности полета при изменениях в организации УВД, вводе в эксплуатацию новой авиационной и техники, увеличении плотности полета, сложности воздушной обстановки и др.

4. Совершенствование бортовых навигационных средств и систем управления воздушным движением позволит обеспечить более высокую точность выдерживания линии пути и высоты полета, что положительно

отразится на уровне безопасности полетов.

Материалы диссертации переданы для внедрения в Бюро гражданской авиации Китая и на кафедру автоматизированных систем управления воздушным движением КИИГА для использования в учебном процессе и научных исследованиях.

#### Публикации по теме диссертации

1. Чжао Хун Дань. Уточнение методики определения интервалов бокового эшелонирования на параллельных трассах // сборник научных трудов "Повышение эффективности автоматизированных систем управления", 1992, КИИГА.
2. Чжао Хун Дань и другие. Разработка принципов комплексной автоматизации процессов управления воздушным движением на Украине. Отчет по НИР. 030-ГБ-92, Киев: КИИГА, 1993.
3. Чжао Хун Дань. Прогнозирование риска опасных сближений и столкновений воздушных судов на пересекающихся трассах. В сб. "Моделирование процессов безопасности полетов" - Киев: КИИГА, (в печати).

#### Список обозначений, принятых в диссертации

$N_R$  - число перекрытий в направлении  $R$  ( $R$  может быть  $X, Y, Z$ ) за летный час;

$P_R$  - вероятность того, что перекрытие случится в направлении  $R$ ;

$f_1(Y)$  - плотность вероятности того, что ВС будет иметь отклонение от трассы в направлении  $Y$ ; при пересекающихся трассах, плотность вероятности на второй трассе может записать как  $f_2(Y \cos \alpha - X \sin \alpha)$ , где  $i=1, 2$  для первой и второй трасс соответственно.

$q_1(Y)$  - плотность вероятности как функция боковой скорости ВС.

В системе координат  $XOY$ :

$X$  - положение вдоль первой линии пути;

$Y$  - боковое отклонение от первой линии пути;

$X_1$  - продольная скорость ВС (узлы);

$Y_1$  - боковая скорость ВС;

В системе координат  $X'O'Y'$ :

$X'$  - положение вдоль второй линии пути;

$Y'$  - боковое отклонение от второй линии пути;

$V'_x$  - продольная скорость ВС на второй линии пути;

$V'_y$  - боковая скорость ВС на второй линии пути;

$\dot{X}$  - относительная продольная скорость между двумя ВС;

$\dot{Y}$  - относительная боковая скорость между двумя ВС;

$\dot{Z}$  - относительная вертикальная скорость между двумя ВС;

$|\bar{R}|$  - среднее значение абсолютной величины R;

$P_{xy}$  - вероятность того, что перекрытие случится в плоскости (X, Y);

$N_{xy}$  - число перекрытий в плоскости (X, Y);

$$\sin^{-1}X = \arcsin(X)$$

$$\cos^{-1}X = \arccos(X)$$

$$\text{tg}^{-1}X = \text{arctg}(X)$$

$$\text{ctg}^{-1}X = \text{arcctg}(X)$$

m - эквивалентный знак X;

n - эквивалентный знак Y.

*GWA*

---

Подписано в печать 06.04.94. Формат 60x84/16. Бумага типограф.  
Офсетная печать. Усл.кр.-отт.6. Усл.печ.л. I, I6. Уч.-изд.л. I, 25.  
Тираж 90 экз. Заказ № 65-I . Цена . Изд. № 204/Ш.

---

Издательство КИЛИГА.

252058. Киев-58, проспект Космонавта Комарова, I.

AB 29.625

**AB 29.625**