

УДК 656.021.2

ОЦЕНКА РИСКА КАТАСТРОФ В ДИСПЕТЧЕРСКОЙ ЗОНЕ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

В.Б. СПРЫСКОВ, К.Л. ИСААКЯН, С.В. КУЗНЕЦОВ

Представлены модели рисков катастроф, обусловленных ошибками отображения координатной информации ВС на диспетчерском индикаторе воздушной обстановки. Модели позволяют обосновать требования безопасности к точности отображения координат ВС или оценить текущий риск катастроф на основе анализа наблюдаемых интервалов между ВС и параметров системы наблюдения.

Ключевые слова: риск катастроф, зона ответственности, система наблюдения.

ВВЕДЕНИЕ

Задача оценивания риска катастроф ВС в зоне ответственности диспетчера управления воздушным движением (УВД) при обслуживании ВС с использованием информации системы наблюдения является необходимой для принятия решения по многим важным вопросам организации воздушного движения (ОрВД), например, для выбора значений технических параметров системы наблюдения, обеспечивающих приемлемую безопасность в соответствии с конкретными правилами и процедурами ОрВД, или мониторинг безопасности воздушного движения при предоставлении обслуживания ВС за некоторый календарный период времени.

В общем случае будем исходить из того, что диспетчер выполняет процедуры обслуживания воздушного движения и, в том числе, эшелонирование ВС на основании анализа координатной информации с ошибками технических средств наблюдения и отображения меток ВС на диспетчерском индикаторе воздушной обстановки (ИВО). Из-за того факта, что фактическое положение ВС всегда отличается от положения, отображаемого на диспетчерском ИВО в любом фрагменте воздушного движения за интервал времени $[t_0, t_1]$, существует угроза безопасности воздушного движения.

В рамках настоящих исследований будем оценивать риск катастроф в результате возможных столкновений ВС в воздухе (midaircollision) из-за применения конкретных процедур обслуживания и наличия ошибок отображения меток ВС на диспетчерском ИВО. При этом под временем t_1 будем понимать некоторое текущее время, а под временем t_0 - некоторое предыдущее время.

Таким образом, ставится задача оценки рисков катастроф воздушного движения сектора УВД на основе апостериорного анализа относительных расстояний и скоростей ВС, отображенных на диспетчерском ИВО.

1. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВС В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА ЗА ЗАДАННЫЙ ИНТЕРВАЛ ВРЕМЕНИ

Рассмотрим интервал времени $[t_0, t_1]$, в течение которого пара ВС совершает относительное движение в горизонтальной плоскости по пересекающимся маршрутам без изменения угловых и скоростных параметров относительного движения. В общем виде схема движения может быть такой же, как на рис. 1.

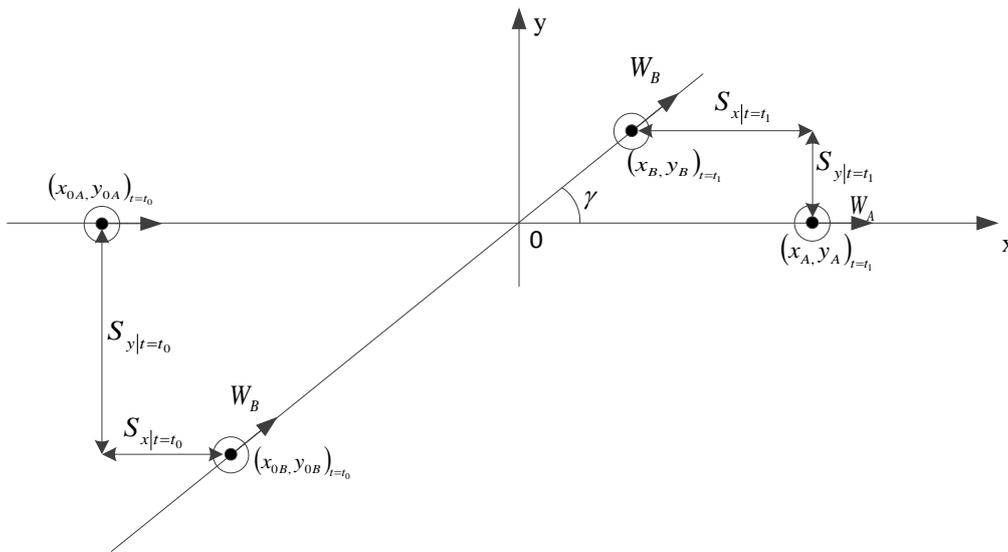


Рис. 1. Наблюдаемое движение пары ВС в горизонтальной плоскости

Наблюдаемое относительное расстояние пары ВС в соответствии со схемой движения рис. 1 может быть описано как:

$$\begin{aligned} x_B(t) - x_A(t) &= S_x(t) = (x_{0B} - x_{0A}) + (W_B \cdot \cos \gamma - W_A) \cdot t; \\ y_B(t) - y_A(t) &= S_y(t) = (y_{0B} - y_{0A}) + W_B \cdot \sin \gamma \cdot t; \\ z_B(t) - z_A(t) &= S_z(t) = \text{const} < RVSM, \end{aligned} \quad (1)$$

где $t \in [t_0, t_1]$; γ – разность путевых углов движения ВС; W_A, W_B – путевые скорости полетов ВС; $(x_{0A}, y_{0A}), (x_{0B}, y_{0B})$ – координаты ВС в момент времени t_0 .

Схема относительного движения и параметрические формулы (1) остаются справедливыми для описания относительного движения ВС по одному маршруту и по параллельным в горизонтальной плоскости маршрутам.

Для рассматриваемых типов относительного движения ВС в горизонтальной плоскости вероятность столкновения за интервал времени $[t_0, t_1]$ может быть оценена в соответствии с нестационарной моделью ИКАО [1] следующим образом [2], [3], [4]:

$$P_{collision}^{xy}(t_0, t_1) = 2\pi\lambda_{xy}^2 \lambda_z C_z(S_z) \cdot \left(\frac{2}{\pi} \cdot \frac{|V_{rel}|}{\lambda_{xy}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{|\bar{z}|}{\lambda_z} \right) \cdot \int_{t_0}^{t_1} C_\gamma(S_x(t); S_y(t)) dt, \quad (2)$$

где $V_{rel} = \left((W_B \cos \gamma - W_A)^2 + (W_B \sin \gamma)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$; W_A, W_B – путевые скорости полетов ВС; λ_{xy} – радиус кругового цилиндра, аппроксимирующего критический объем столкновения ВС в горизонтальной плоскости; λ_z – высота кругового цилиндра; $|\bar{z}|$ – модуль средней относительной вертикальной скорости ВС; $C_z(S_z)$ – плотность вероятности перекрытия ВС в вертикальной плоскости, номинально разделенных на диспетчерском ИВО расстоянием S_z ; $C_\gamma(S_x(t); S_y(t))$ – плотность вероятности перекрытия пары ВС в горизонтальной плоскости, номинально разделенных на диспетчерском ИВО в момент времени t на S_x, S_y .

Для формального описания плотности $C_z(S_z)$ и $C_\gamma(S_x(t); S_y(t))$ рассмотрим отклонения фактических координат ВС от номинальных (отображаемых) положений в горизонтальной плоскости диспетчерского индикатора воздушной обстановки.

Будем считать, что фактические координаты ВС для любого момента времени $t \in [t_0, t_1]$ отличаются от наблюдаемых по всем трем направлениям и описываются плотностями $f_A(\xi_A, \eta_A, \zeta_A)$ и $f_B(\xi_B, \eta_B, \zeta_B)$. Отклонения $\xi_{A(B)}$ совпадают с направлением движения ВС, а системы $(O_{A(B)}, \xi_{A(B)}, \eta_{A(B)}, \zeta_{A(B)})$ представляют правые ортогональные системы координат. Полагаем, что отклонения фактических координат по трем направлениям любого из ВС рассматриваемой пары независимы друг от друга, а для обоих ВС – совместно независимы.

Введем общую для ВС пары систему отклонений $O\xi\eta\zeta$, совпадающую с отклонениями ВСА от отображаемых положений.

Тогда в общей системе $(O\xi\eta\zeta)$ координаты точки O_A будут равны $(0, 0, 0)$; координаты точки $O_B - (S_x, S_y, S_z)$. Плотности вероятностей отклонений фактических положений ВС А и ВС В от наблюдаемых в общей системе координат $(O\xi\eta\zeta)$ будут равны:

$$\begin{aligned} f_A(\xi, \eta, \zeta) &= f_A(\xi) \times f_A(\eta) \times f_A(\zeta); \\ f_B(\xi, \eta, \zeta) &= f_B((\xi - S_x) \cos \gamma + (\eta - S_y) \sin \gamma) \times \\ &\times f_B(-(\xi - S_x) \sin \gamma + (\eta - S_y) \cos \gamma) \times f_B(\zeta - S_z). \end{aligned}$$

Для вычисления $C_z(S_z)$ используют выражение:

$$C_z(S_z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_A(\zeta) \cdot f_B(\zeta - S_z) d\zeta. \quad (3)$$

Для вычисления $C_\gamma(S_x, S_y)$ используют выражение:

$$\begin{aligned} C_\gamma(S_x, S_y) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_A(\xi) \times f_A(\eta) \times f_B[(\xi - S_x) \cos \gamma + (\eta - S_y) \sin \gamma] \times \\ &\times f_B[-(\xi - S_x) \sin \gamma + (\eta - S_y) \cos \gamma] d\xi d\eta. \end{aligned} \quad (4)$$

Вычисление вероятности столкновения пары ВС по формуле (2) по сути сводится к нахождению площади вертикального сечения двумерной плотности $C_\gamma(S_x, S_y)$ по линии относительной траектории $S_x(t), S_y(t)$, где $t \in [t_0, t_1]$. При этом риск катастрофы рассматриваемой пары ВС в течение интервала $[t_0, t_1]$ из-за неточного отображения фактических положений ВС на диспетчерском ИВО следует оценивать величиной:

$$N_{axy}(t_0, t_1) = \frac{2 \cdot P_{collision}^{xy}(t_0, t_1)}{t_1 - t_0}. \quad (5)$$

2. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВС В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ С ИЗМЕНЕНИЕМ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА ЗА ЗАДАННЫЙ ИНТЕРВАЛ ВРЕМЕНИ

Данный тип относительного движения встречается при изменении высоты полета ВС с пересечением занятых эшелонов полетов другими ВС. По аналогии с предыдущим случаем, будем считать, что за интервал времени $[t_0, t_1]$ пара ВС движется в вертикальной плоскости, одно из них – с изменением высоты полета, оба – без изменения путевых скоростей и бокового интервала между ними. В общем виде схема движения может быть такой же, как на рис. 2.

Наблюдаемые относительные расстояния в соответствии со схемами движения ВС рис. 2 могут быть описаны как:

$$\begin{aligned} x_B(t) - x_A(t) &= S_x(t) = (x_{0B} - x_{0A}) \pm (W_B - W_A) \cdot t; \\ z_B(t) - z_A(t) &= S_z(t) = (z_{0B} - z_{0A}) + W_B \cdot t g \beta \cdot t; \\ y_B(t) - y_A(t) &= S_y(t) = y_{0B} - y_{0A} = const, \end{aligned} \quad (6)$$

где знак «+» соответствует пересечению занятого попутного, а знак «-» - занятого встречного эшелона.

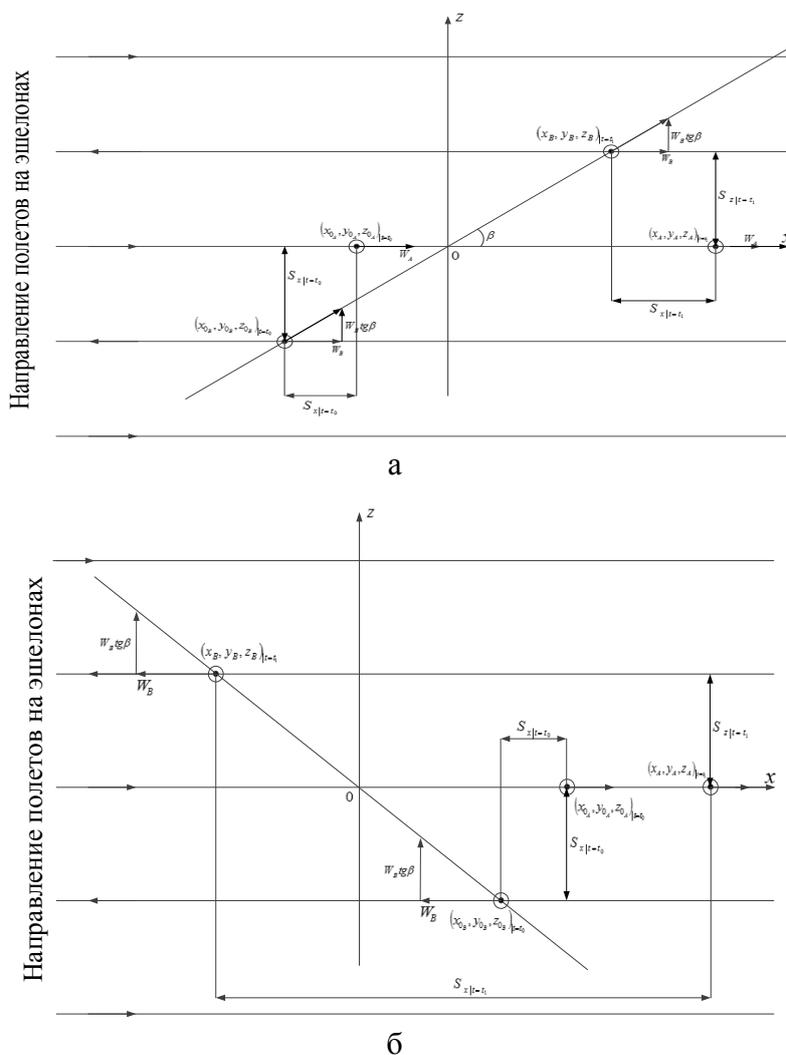


Рис. 2. Наблюдаемое движение пары ВС при пересечении занятых эшелонов:
а) схема пересечения попутного эшелона; б) схема пересечения встречного эшелона

Для рассматриваемых типов относительного движения в вертикальной плоскости вероятность столкновения пары ВС за интервал времени $[t_0, t_1]$ может быть оценена в соответствии с нестационарной моделью ИКАО [1] следующим образом [5], [6], [7]:

$$P_{collision}^{xz}(t_0, t_1) = 2\pi\lambda_{xy}^2 \cdot \lambda_z \cdot C_y(S_y) \cdot \left(\frac{2}{\pi} \cdot \frac{|V_{rel}|}{\lambda_{xy}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{|\bar{z}|}{\lambda_z} \right) \cdot \int_{t_0}^{t_1} C_\beta(S_x(t), S_z(t)) dt, \quad (7)$$

где $|V_{rel}|$ - относительная скорость ВС в горизонтальной плоскости [6, 7]; $W_A, W_B, \lambda_{xy}, \lambda_z$ - соответствуют описанию параметров модели (2); $|\bar{z}| = |W_2 \cdot tg\beta|$; β - угол пересечения траекторий ВС в вертикальной плоскости; $C_y(S_y)$ - плотность вероятности перекрытия пары ВС в боковой плоскости, номинально разделенных расстоянием S_y ; $C_\beta(S_x, S_z)$ - плотность вероятности перекрытия пары ВС в вертикальной плоскости, номинально разделенных в момент времени t на S_x, S_z .

Введем системы координат $(0_A, \xi_A, \eta_A, \zeta_A), (0_B, \xi_B, \eta_B, \zeta_B)$ и $(0, \xi, \eta, \zeta)$, обладающими теми же свойствами, что и в предыдущем случае горизонтального движения.

Плотности вероятностей отклонений фактических положений ВС от наблюдаемых в системе координат $(0, \xi, \eta, \zeta)$ будут равны соответственно:

$$f_A(\xi, \eta, \zeta) = f_A(\xi) \times f_A(\eta) \times f_A(\zeta), \quad (8)$$

$$f_B(\xi, \eta, \zeta) = f_B(\xi - S_x) \times f_B(\eta - S_y) \times f_B((\zeta - S_z) + tg\beta(\xi - S_x)). \quad (9)$$

Тогда для вычисления $C_y(S_y)$ используют выражение:

$$C_y(S_y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_A(\eta) \cdot f_B(\eta - S_y) d\eta, \quad (10)$$

а для вычисления $C_\beta(S_x, S_z)_t$ используют свертку функций вида:

$$C_\beta(S_x, S_z)_t = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_A(\xi) \times f_A(\zeta) \times f_B(\xi - S_x) \times f_B((\zeta - S_z) + tg\beta(\xi - S_x)) d\xi d\zeta. \quad (11)$$

Если $\beta = 0$ (относительное движение без изменения относительной высоты), то свертка (11) будет представлять собой перемножение одномерных сверток $C_x(S_x)$ и $C_z(S_z)$.

Вычисление вероятности $P_{collision}^{xz}(t_0, t_1)$ (модель (7)) по сути сводится к нахождению площади вертикального сечения функции $C_\beta(S_x, S_z)$ по линии траектории $\{S_x(t), S_z(t)\}$, $t \in [t_0, t_1]$. При этом оцениваемый риск может быть вычислен как:

$$N_{axz}(t_0, t_1) = \frac{2 \cdot P_{collision}^{xz}(t_0, t_1)}{t_1 - t_0}. \quad (12)$$

Если задать ограничение на значение риска (5) и (12), то всегда можно обосновать ограничения на аргументы риска в виде параметров точности отображения координат ВС, скоростных и угловых характеристиках относительного движения, при которых безопасность решения задачи эшелонирования находится на приемлемом уровне.

Если использовать фактическую информацию о диспетчерской зоне в части:

- параметров системы наблюдения ОВД;
- траекторий ВС, при которых интервалы нарушены [8], [9];
- интервалов времени $[t_0, t_1]$ с нарушениями интервалов,

то можем оценить фактический риск катастроф зоны ответственности за календарный период $[T_0, T_1]$:

$$N_{axy}(T_0, T_1) = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^N P_{collision}^{xy}(t_{0i}, t_{1i})}{T_{\Sigma}}, \quad N_{axz}(T_0, T_1) = \frac{2 \cdot \sum_{j=1}^M N_{collision}^{xz}(t_{0j}, t_{1j})}{T_{\Sigma}},$$

где T_{Σ} - суммарное полетное время ВС, обслуженных в зоне за календарный период $[T_0, T_1]$; (t_{0i}, t_{1i}) , (t_{0j}, t_{1j}) - интервалы времени с нарушениями интервалов эшелонирования; N - число нарушений интервалов в горизонтальной плоскости; M - число нарушений интервалов в вертикальной плоскости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены модели оценки риска катастроф, обусловленного ошибками отображения координатной информации о положениях ВС на диспетчерских индикаторах воздушной обстановки.

Рассмотрены две типовые задачи применения указанных моделей рисков катастроф, позволяющие:

- оценить безопасность полетов ВС при решении задачи эшелонирования с использованием информации диспетчерского индикатора воздушной обстановки;
- оценить безопасность полетов ВС в зоне ответственности УВД за календарный период времени.

Представленные модели позволяют решать важные задачи управления безопасностью полетов, в том числе:

- обоснования требований к техническим характеристикам системы наблюдения ОВД, достаточных для безопасного решения задач эшелонирования ВС с использованием информации наблюдения;
- мониторинг безопасности полетов в зоне ответственности системы УВД за календарный период на основе апостериорного анализа информации наблюдения.

ЛИТЕРАТУРА

1. A unified Framework for Collision Risk Modeling in Support of the Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima (Doc 9689). – Monreal, ICAO, Cir 319 – AN/181, 2009.
2. **Spryskov V.** Comparison of Two Methods of Computation Aircraft Horizontal Overlap Probability on the Air Route Intersection – SASP WG/WHL/1, Canberra, Australia, 3-13 May, 2002.

3. Грибков И.М., Спрысков В.Б., Щербаков Е.К. Модель оценки риска катастроф ВС при движении по пересекающимся воздушным трассам на одной высоте // Научный вестник МГТУ ГА. 2005. № 90. С. 53-62.

4. Спрысков В.Б., Исаакян К.Л., Кузнецов С.В. Модель оценки безопасности полетов при движении воздушных судов по пересекающимся маршрутам // Научный вестник ГосНИИ «Аэронавигация». 2012. № 11. С. 143-154.

5. Грибков И.М., Спрысков В.Б., Щербаков Л.К. Оценка вероятности столкновения ВС при пересечении занятых эшелонов. // Научный вестник МГТУ ГА. 2006. № 99. С. 54-61.

6. Spryskov V. A Model for Collision Probability Estimating of Airplane Intersecting Flight Level Occupied by Another Airplane - SASP WG/WHL/14, Paris, 13-24 October, 2008.

7. Спрысков В.Б., Исаакян К.Л., Кузнецов С.В. Уточнение модели оценки вероятности столкновения при пересечении воздушным судном занятого эшелона полета другого воздушного судна // Научный вестник ГосНИИ «Аэронавигация». 2009. № 9. С. 61-65.

8. Спрысков В.Б., Кузнецов С.В. Прикладные задачи обоснования минимальных интервалов эшелонирования воздушных судов с использованием системы наблюдения обслуживания воздушного движения в соответствии с отечественными и международными правилами // Научный вестник ГосНИИ «Аэронавигация». 2011. № 11. С. 47-63.

9. Соломенцев В.В., Спрысков В.Б., Кузнецов С.В. Анализ основных различий международных и российских правил эшелонирования воздушных судов при пересечении занятых эшелонов и маршрутов с использованием системы наблюдения обслуживания воздушного движения // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 180. С. 26-39.

ESTIMATION OF AIRCRAFT ACCIDENT RISK IN CONTROLLER RESPONSIBILITY ZONE AIRSPACE WHILE PROVIDING AIRCRAFT SERVICE WITH ATM SURVEILLANCE SYSTEM DATA

Spryskov V.B., Isaakian K.L., Kuzntesov S.V.

The article describes the models for assessing aircraft accident risk due to aircraft coordinate information errors at the controller's air situation display. The models allow to justify safety requirements on aircraft coordinates display accuracy or to assess the current aircraft accident risk by analyzing observed intervals between aircraft and parameters of the surveillance system.

Keywords: accident risk, responsibility zone, surveillance system.

REFERENCES

1. A unified Framework for Collision Risk Modeling in Support of the Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima (Doc 9689). – Monreal, ICAO, Cir 319 – AN/181, 2009.

2. Spryskov V.B. Comparision of Two Methods of Computation Aircraft Horizontal Overlap Probability on the Air Route Intersection – SASP WG/WHL/1, Canberra, Australia, 3-13 May, 2002.

3. Gribkov I.M., Spryskov V.B., Sherbakov E.K. Model otsenki riska katastrof VS pri dvizhenii po peresekajushimsja vozdushnym trassam na odnoj vysote // Nauchnyj vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta grazhdanskoj aviicii. 2005. № 90. P. 53-62.

4. Spryskov V.B., Isaakjan K.L., Kuznetsov S.V. Model otsenki bezopasnosti poletov pri dvizhenii vozdushnyh sudov po peresekajushhimsja marshrutam // Nauchnyj vestnik GosNII «Aeronavigacija». 2012. № 11. P. 143-154.

5. Gribkov I.M., Spryskov V.B., Sherbakov L.K. Otsenka verojatnosti stolknovenija VS pri peresechenii zanjatyh jeshelonov // Nauchnyj vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta grazhdanskoj aviacii. 2006. № 99. P. 54-61.

6. Spryskov V.B. A Model for Collision Probability Estimating of Airplane Intersecting Flight Level Occupied by Another Airplane - SASP WG/WHL/14, Paris, 13-24 October, 2008.

7. Spryskov V.B., Isaakjan K.L., Kuznetsov S.V. Utochnenie modeli otsenki verojatnosti stolknovenija pri peresechenii vozdušnym sudnom zanjatogo jeshelona poleta drugogo vozdušnogo sudna // Nauchnyj vestnik GosNII «Aeronavigacija». 2009. № 9. P. 61-65.

8. Spryskov V.B., Kuznetsov S.V. Prikladnye zadachi obosnovanija minimalnyh intervalov jeshelonirovanija vozdušnyh sudov s ispolzovaniem sistemy nabljudenija obsluzhivaniya vozdušnogo dvizhenija v sootvetstvii s otechestvennymi i mezhdunarodnymi pravilami // Nauchnyj vestnik GosNII «Aeronavigacija». 2011. № 11. P. 47-63.

9. Solomentcev V.V., Spryskov V.B., Kuznetsov S.V. Analiz osnovnyh razlichij mezhdunarodnyh i rossijskih pravil jeshelonirovanija vozdušnyh sudov pri peresechenii zanjatyh jeshelonov i marshrutov s ispolzovaniem sistemy nabljudenija obsluzhivaniya vozdušnogo dvizhenija // Nauchnyj vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta grazhdanskoj aviacii. 2012. № 180. P. 26-39.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Спрысков Владимир Борисович, 1951 г.р., окончил МАИ им. С. Орджоникидзе (1975), МГУ им. М.В. Ломоносова (1983), доктор технических наук, главный научный сотрудник филиала «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИГА, автор более 120 печатных работ, область научных интересов – безопасность воздушного движения. E-mail: spryskov@atminst.ru.

Исаакян Карен Левонович, 1951 г.р., окончил МЭИС (1973), МИЭМ (1981), старший научный сотрудник филиала «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИГА, автор более 30 печатных работ, область интересов – безопасность воздушного движения.

Кузнецов Сергей Вадимович, 1985 г.р., окончил МГТУ ГА (2008), старший научный сотрудник филиала «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИГА, автор 10 печатных работ, область научных интересов – системы наблюдения обслуживания воздушного движения, безопасность воздушного движения. E-mail: kuznetsov@atminst.ru.