

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЛУЧАЙНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА ПРИ ЗАХОДЕ НА ПОСАДКУ

Бобров В.Н.<sup>1</sup>, Корчагин В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФКОУ ВПО «Воронежский институт ФСИН России», Воронеж, Россия (394072, Воронеж, ул. Иркутская, 1 «а»), e-mail: vifsin@mail.ru

В статье рассмотрено влияние приземного слоя атмосферы, расположенного непосредственно у земной поверхности, на определение местоположения, относительно глиссады планирования, воздушного судна выполняющего визуальный заход на посадку. Учитывая физические свойства атмосферы и сложные пространственно-временные изменения показателя преломления атмосферы, была получена математическая модель позволяющая рассчитать возможные ошибки в определении местоположения воздушного судна относительно глиссады планирования. В основе математической модели лежит закон преломления. При прохождении границы раздела соседних слоев с различными значениями показателя преломления наблюдается отклонение траектории наблюдения взлетно-посадочной полосы от прямолинейной. При выполнении визуального захода на посадку воздушное судно может находиться как ниже, так и выше глиссады планирования. Это приводит к недолету, либо перелету воздушным судном зоны контакта с взлетно-посадочной полосой. Исходными данными для расчёта величины возможных ошибок, при определении случайного положения воздушного судна относительно глиссады планирования, служат сведения о фактическом состоянии метеорологических элементов и высоты захода воздушного судна на посадку.

Ключевые слова: визуальный заход на посадку, глиссада планирования, случайное положение воздушного судна, показатель преломления.

## CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF A RANDOM POSITION OF THE AIRCRAFT DURING LANDING

Bobrov V.N.<sup>1</sup>, Korchagin V.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, Voronezh, Russia (394072, Voronezh, street Irkutskaya 1-a.), vifsin@mail.ru

The article considers the influence of the atmospheric boundary layer, which is located directly at the earth's surface, to determine the location, relative to the glide path planning, the aircraft performing a visual approach. Taking into account the physical properties of the atmosphere and complex spatio-temporal changes in the refractive index of the atmosphere, was obtained mathematical model allows to calculate the errors in determining the position of the aircraft relative to the glide path planning. The basis of the mathematical model is based on the law of refraction. With the passage of the interface of adjacent layers with different refractive indices, a deviation of the trajectory observations of the runway from the straight. When performing a visual approach the aircraft can be located both below and above the glide path planning. This leads to an undershoot or an aircraft's flight zone of contact with the runway. Initial data for calculation of the range of possible errors in the determination of the random position of the aircraft relative to the glide path planning, are details about the actual state of the meteorological elements and the height of the aircraft approach for landing.

Keywords: visual approach, glide path, the random position of the aircraft, the refractive index.

Заключительным этапом полета любого воздушного судна является заход на посадку. На этом этапе полета экипаж воздушного судна выводит его на предпосадочную прямую – глиссаду планирования [7, 8].

Выполнение этого этапа полета является самым ответственным и может, осуществляется как с использованием технических средств посадки (с использованием радионавигационного оборудования), так и визуально по естественным ориентирам на

местности. В качестве ориентировки экипаж воздушного судна использует естественную линию горизонта и наблюдаемую взлетно-посадочную полосу (ВПП) [7, 8].

Следует отметить, что визуальный заход на посадку экипажу воздушного судна разрешают выполнять органы воздушного движения (ОВД) в случае установления визуального контакта ВПП [7, 8].

Главными факторами, оказывающими влияние на установление визуального контакта экипажа воздушного судна с ВПП, являются метеорологические величины (метеорологические минимумы). Значения метеорологических минимумов для каждого воздушного судна и конкретного аэродрома различны. Эти минимумы рассчитываются по специальным методикам для каждого аэродрома с учетом естественных и искусственных препятствий находящихся в непосредственной близости от аэродрома. Кроме того учитываются и особенности скоростного режима воздушного судна выполняющего заход на посадку [7, 8]. В качестве примера приведем типичные значения метеорологических минимумов:

- видимость 2-3 км, высота нижней границы облаков 150-300 метров – для визуального захода на посадку самолетов 4 класса (АН-2, вертолеты всех типов);

- видимость 5 км, высота нижней границы облаков 600 метров – для визуального захода на посадку самолетов 1-3 класса (АН 24 и все более тяжелые) [7, 8].

**Целью работы** – определение возможных отклонений воздушного судна относительно глиссады планирования (выше или ниже) при совершении экипажем воздушного судна визуальной посадки.

**Материалы исследований.** Метеорологические величины изменяются как во времени, так и в пространстве. Известно что, совокупность значений метеорологической величины во всём пространстве называют полем этой величины.

Слой атмосферы неоднороден и может быть разделен на приземный подслой (слой трения) и свободную атмосферу. В подслоях наблюдаются несколько еще более тонких слоев, отличающихся от соседних величиной показателя преломления[5].

К ним относятся: инверсии - слои с резким локальным падением температуры, слои повышенной влажности, слои с повышенным содержанием аэрозолей, облачные; наконец, такие локальные образования как пузыри и термики, также могут располагаться в воздухе слоями [5].

Количественной мерой изменения метеорологических величин в пространстве служат градиенты этих величин. Наибольший практический интерес представляют горизонтальный и вертикальный градиенты метеовеличин. Горизонтальный градиент всегда положителен[6,9].

Вертикальный градиент может быть как положительным, так и отрицательным. Справедливо следующее общее правило: если метеорологическая величина убывает, то вертикальный градиент положителен, если величина растет с высотой, то вертикальный градиент этой величины отрицателен. Наиболее важные в метеорологической практике – вертикальный и горизонтальный градиенты давления и температуры [6, 9].

Будем характеризовать слоистые неоднородности величиной градиента показателя преломления на их границах, т.е. в переходном слое. Здесь следует заметить, что количество слоев, находящихся одновременно на километровом интервале высоты неравномерно распределено по высоте. Так, например, на высотах 0,1-2 км в среднем слоев в два раза больше, чем на высотах 3-5 км [5].

В [4] были представлены восстановленные на основе данных температурно-ветрового зондирования атмосферы профили показателя преломления атмосферы. При определении величины показателя преломления использовалась зависимость последнего от абсолютной температуры ( $T$ ), атмосферного давления ( $p$ ) и парциального давления водяного пара ( $e$ )

$$n = 1 + 10^{-6} N = 1 + 10^{-6} \left[ \frac{77,6}{p} \left( p + 4810 \frac{e}{T} \right) \right], \quad (1)$$

где множитель при  $10^{-6}$  представляет собой показатель преломления атмосферы, выраженный в  $N$  - единицах [1, 2, 5].

В результате проведенных исследований в [2, 4] было установлено, что в атмосфере возникают сезонные и суточные изменения показателя преломления, которые способны приводить к искажениям траекторий визуального наблюдения в атмосфере. Для устранения ошибок при определении местоположения воздушного судна относительно ВПП необходимо учитывать возникающие в атмосфере изменения показателя преломления [4].

В качестве источника получения информации о показателе преломления служит фактическое состояние слоя атмосферы в районе ВПП, а именно температура, влажность воздуха и атмосферное давление.

В рамках поставленной задачи в [3] было сделано предположение о том, что земная поверхность является плоской, т.е. ее кривизной можно пренебречь. Атмосфера здесь представляется как совокупность тонких слоев с постоянными, в пределах слоя, значениями показателя преломления ( $n_0, n_1, \dots, n_i$ ), т.е. слои расположены параллельно земной поверхности, причем  $n_0 < n_i$  [1]. Для удобства рассмотрения вертикальная ось направлена вниз к земной поверхности.

В [3] были получены аналитические выражения определяющие положение воздушного судна в пространстве относительно глissады планирования.

Так выражение (2) позволяет определить проекцию на земную поверхность траектории наблюдения через  $i$ -слой атмосферы с учетом вертикального градиента показателя преломления атмосферы  $\gamma_n$  [1, 3].

$$L_{имек} = \frac{n_i}{\gamma_{n_{i-1}}} \sin \psi_{i-1} \ln \left[ \frac{1 + z_i + \sqrt{(1 + z_i)^2 - \sin^2 \psi_{i-1}}}{1 + \cos \psi_{i-1}} \right], \quad (2)$$

где  $z_i = (h_i - h_{i-1}) \frac{\gamma_{n_{i-1}}}{n_{i-1}}$ ,  $\gamma_{n_{i-1}} = \frac{n_i - n_{i-1}}{h_i - h_{i-1}}$ ,  $n_{i-1} = n(h_{i-1})$  и  $n_i = n(h_i)$ .

Траектория визуального определения местоположения ВПП может сильно отличаться от прямолинейной и зависит от вертикального профиля показателя преломления атмосферы [3]. Так, ВПП может наблюдаться как ближе, так и дальше своего истинного местоположения. При этом величина ошибок определения горизонтальной дальности ВПП будет зависеть от величины вертикального градиента показателя преломления атмосферы, мощности слоев, в которых наблюдаются эти градиенты, а также величины угла наблюдения ВПП по отношению к горизонту [2, 4].

Следует также заметить что, прежде чем воздушное судно достигнет точки, находящейся от начала ВПП на расстоянии 4 км допускаются определенные отклонения от глissады. После этого о любых отклонениях от глissады воздушному судну орган ОВД сообщает конкретное расстояние (в метрах) выше или ниже глissады.

При отклонениях воздушного судна от курса и глissады на участке траектории полета за пределы, превышающие предельно допустимые, орган ОВД дает команду его экипажу об уходе на второй круг [7].

В данной работе предпринята попытка в рамках граничных условий описанных в [3], учитывая вертикальный профиль показателя преломления провести расчет возможных отклонений воздушного судна выше или ниже относительно глissады планирования.

Пусть ВС находится в точке А на высоте  $h_0$  от земной поверхности (рис.1). Горизонтальная дальность ВПП от ВС определяется проекцией траектории наблюдения из точки А до ВПП на ось ОХ, направленную вдоль поверхности земли. Наблюдение ВПП осуществляется под углом  $\varphi_0$  относительно нормали к земной поверхности в направлении АВ, т.е. глissады планирования. Вертикальные изменения показателя преломления атмосферы приводят к изменению траектории наблюдения АО' и величину угла  $\varphi_0$  [3].

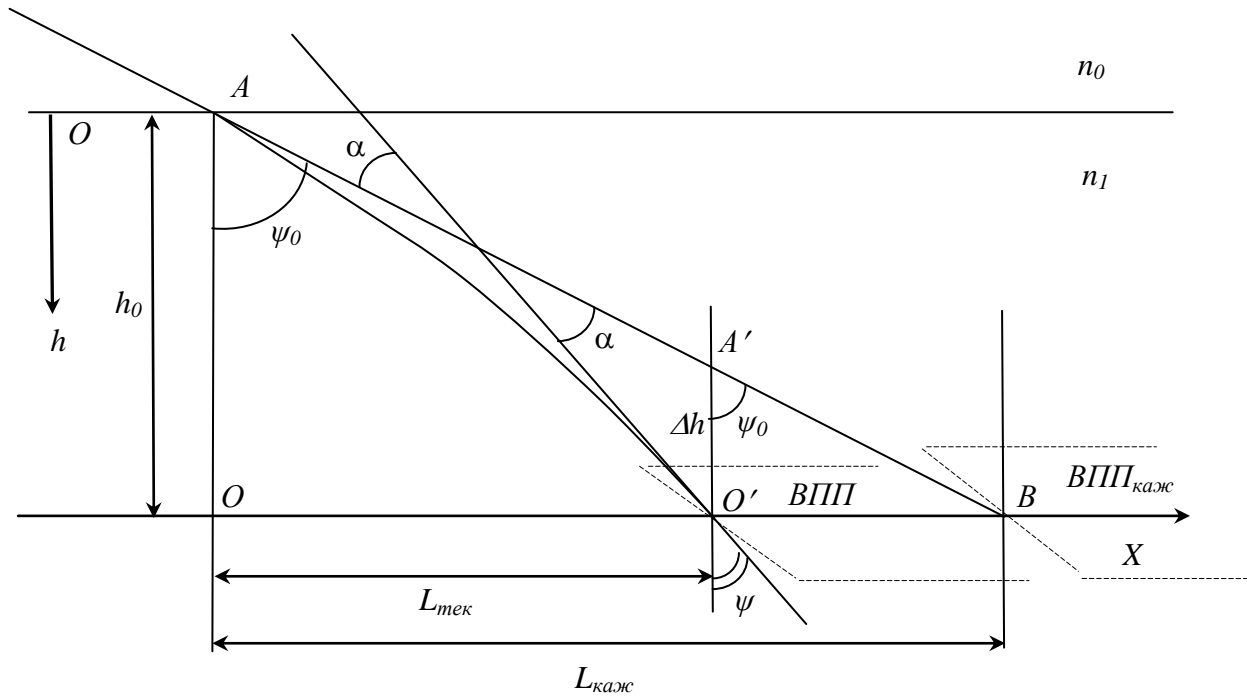


Рис. 1. Реальное и кажущееся положение воздушного судна относительно глissады снижения

Из треугольников  $AOB$  и  $A'O'B$  (рис.1) имеем

$$\frac{AO}{OB} = \frac{A'O'}{O'B}. \quad (3)$$

Выразив  $A'O'$  из (3) получим:

$$A'O' = \frac{AO \cdot O'B}{OB}. \quad (4)$$

Заменив в (4) стороны треугольников  $AOB$  и  $A'O'B$  через их соответствующие значения (см. рис. 1) и с учетом того что

$$AO = \Delta h$$

и

$$L_{каж} = h_0 \operatorname{ctg} \psi_0$$

окончательно получим:

$$\Delta h = \frac{h_0(L_{каж} - L_{тек})}{L_{каж}} = h_0 - ctg\psi_0 L_{тек} \quad (5)$$

Известно, что на границе раздела соседних слоев с различными значениями показателя преломления выполняется известное соотношение:

$$n_0 \sin \varphi_0 = n_1 \sin \varphi_1, \quad (6)$$

где  $n_0, n_1$  – показатели преломления на границе раздела соседних слоев;  $\varphi_0, \varphi_1$  – угол падения и преломленный угол относительно нормали к границе раздела двух соседних слоев с показателями преломления  $n_0$  и  $n_1$  соответственно.

Из рис. 1, в случае  $n_1 > n_0$  видно, что отклонение прямолинейной траектории  $AB$  к виду  $AO'$ , приводит к отклонению горизонтальных проекций соответствующих траекторий на земную поверхность и вызывает ошибку в определении положения ВПП, проекции  $L_{каж}$  и  $L_{тек}$  соответственно [3].

Вывод формулы для  $L_{тек}$  – проекции на земную поверхность траектории наблюдения через  $i$ -й слой атмосферы достаточно подробно представлен в [1] и в этой статье не приводится.

Подставляя в выражение (5) выражение для расчета  $L_{тек}$  и проводя соответствующие преобразования в общем виде получим:

$$\Delta h = h_{i-1} - \frac{n_i}{\gamma_{i-1}} \cos \psi_{i-1} \cdot \ln \left[ \frac{1 + z_i + \sqrt{(1 + z_i)^2 - \sin^2 \psi_{i-1}}}{1 + \cos^2 \psi_{i-1}} \right]. \quad (7)$$

**Заключение.** Подставляя в полученное выражение данные о фактическом состоянии вертикального профиля метеорологических элементов и величин их градиентов можно рассчитать величину возможных ошибок и определить случайное положение воздушного судна относительно глиссады планирования при совершении экипажем визуального захода на посадку.

### Список литературы

1. Бобров В.Н. Информационная модель прохождения оптического сигнала на наклонной трассе в приземном слое атмосферы // Проектирование и технология электронных средств. – 2012. - №4. – С.12-14.

2. Бобров В.Н. Учет информационных ресурсов градиентной атмосферы при проектировании электронных средств контроля // Проектирование и технология электронных средств. – 2013. - №2. – С.51-54.
3. Бобров В.Н., Нахмансон Г.С. Влияние вертикального распределения показателя преломления атмосферы на визуальное определение местоположения взлетно-посадочной полосы с борта воздушного судна // Метеорология и гидрология. – 2003. - №1. - С.58 - 63.
4. Бобров В.Н., Нахмансон Г.С. О сезонном и суточном изменении вертикального профиля показателя преломления атмосферы в приземном слое // Метеорология и гидрология. – 2002. - №12. - С.36- 39.
5. Казаков Л.Я., Ломакин А.Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. – М.: Наука, 1976. 165с.
6. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 778с.
7. Приказ Минтранса России от 25.11.2011 №293 (ред. от 12.05.2014) «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Организация воздушного движения в Российской Федерации» (Зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2011 №22874)
8. Приказ Минтранса России от 31.07.2009 №128 (ред. от 10.02.2014) «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» (Зарегистрировано в Минюсте России 31.08.2009 №14645)
9. Храмов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 568с.

**Рецензенты:**

Сумин В.И., д.т.н., профессор, профессор кафедры управления и информационно-технического обеспечения, ФКОУ ВПО «Воронежский институт ФСИН России», г.Воронеж;  
Ирхин В.П., д.т.н., доцент, профессор кафедры основ радиотехники, ФКОУ ВПО «Воронежский институт ФСИН России», г. Воронеж.