

УДК 656.7.052

## **Уточнённая оценка коэффициента опасности посадки при снижении по глиссаде с учётом действия вертикального ветра**

**Еремин А.И.\*, Сельвесюк Н.И.\*\***

*Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем,  
ул. Викторенко, 7, Москва, 125319, Россия*

*\*e-mail: aieremin@2100.gosniias.ru*

*\*\*e-mail: niselvesuk@2100.gosniias.ru*

### **Аннотация**

В статье формулируется и решается задача непрерывного контроля безопасности посадки самолёта в продольном канале управления после начала снижения по глиссаде при действии вертикального ветра и ошибке пилотирования. Компьютерное моделирование показало, что предложенная функция опасности при посадке имитирует нарастание тревоги у лётчика и её снижение при ликвидации опасных полётных ситуаций.

**Ключевые слова:** оптимальное управление, метод динамического программирования, функция риска, аналитическое конструирование оптимальных регуляторов.

### **Введение**

Важным вопросом эксплуатации гражданской и военной авиации является

недопустимое число лётных происшествий, связанных с гибелью пассажиров и экипажа. Для предотвращения опасных ситуаций необходимо создать систему автоматического непрерывного контроля безопасности полёта.

Особенно это касается наиболее ответственного и сложного этапа полёта – захода на посадку и самой посадки. Как показывает статистика лётных происшествий, именно на этот этап приходится больше половины аварийных ситуаций. Согласно исследованию Boeing [1], охватывающему самолеты западного производства в рейсах за 2007-2016 годы, больше всего происшествий с человеческими жертвами случается при снижении и посадке – 59%. Большинство причин аварий относится к человеческому фактору (включая действия экипажа и наземной авиадиспетчерской службы). По этой причине на борту самолёта должны присутствовать вспомогательные средства автоматического контроля безопасности полёта.

Существуют подходы для решения задачи предотвращения конфликтных ситуаций в полёте. В частности, в [2] решается задача определения оптимального времени для манёвра уклонения. В [3] изложено решение задачи обеспечения безопасности полёта воздушного судна при наличии внешних угроз в виде воздушных судов-нарушителей. В [4-5] рассматривается использование разработок IT-систем в области управления безопасностью полётов. Также рассматриваются задачи предупреждения экипажа об опасных режимах полёта [6-10] и выборе оптимальной траектории воздушного участка посадки [11-13]. Рассматривается возможность количественно оценить безопасность полёта по маршруту [14]. Имеются успешные примеры апробации адаптивных алгоритмов управления в САУ

современными и перспективными высокоманевренными самолетами [15-16].

Авторским коллективом разрабатывается подход к контролю безопасности полета на основе вычисления функции опасности [17-20]. Преимуществом данного подхода является осуществление прогноза при гипотезе об оптимальном устранении угрозы по назначенному интегральному критерию. Проведённые ранее исследования [17] показали возможность вычисления количественного значения коэффициента опасности  $P_e$  продольного движения при посадке, обусловленного ошибками пилотирования. В данной работе рассматривается уточнение расчета функции опасности с учетом важного фактора на этапе посадки – действия вертикального ветра.

Главной особенностью предложенного в работе подхода является осуществление прогноза последствий опасных отклонений от глиссады при гипотезе об оптимальном устранении угрозы по назначенному интегральному критерию, оценивающему качество приземления в конце посадки. Оптимальное управление находится с помощью метода динамического программирования [21], позволяющего при упрощающем предположении о динамике полёта осуществить традиционное аналитическое конструирование оптимальных регуляторов – АКОР [22]. Кроме того, особенностью динамического программирования является способность оценить с помощью правой части уравнения Беллмана текущую функцию оптимального риска, которая обладает прогнозирующими свойствами [18-19].

Опираясь на эти свойства, в данной работе формулируется и решается задача непрерывного контроля безопасности посадки самолёта в продольном канале управления после начала снижения по глиссаде, что относится к одному из

ответственных режимов полёта.

### Постановка задачи

Задана математическая модель продольного движения самолёта при снижении по глиссаде и действии вертикального ветра с помощью следующих дифференциальных уравнений:

$$f(x) = \begin{pmatrix} \dot{y}_1 = y_2, & y_2 = H_0 \\ \dot{y}_2 = -a y_2 + b U, & y_2 = 0 \\ \dot{x} = -V, & x(0) > \frac{Hn}{\theta} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $y_1$  – текущее фактическое значение высоты;  $y_2$  – текущая вертикальная скорость;  $x$  – текущая дальность до точки приземления;  $U$  – синтезируемый сигнал управления;  $a$  и  $b$  – заданные коэффициенты при упрощенной динамике полёта.

Рассматривается продольное движение самолёта при управлении высотой полёта по заданной программе. Схема моделирования в системе Simulink Matlab изображена на рис.1. Программа требуемого изменения высоты приведена на рис. 2.

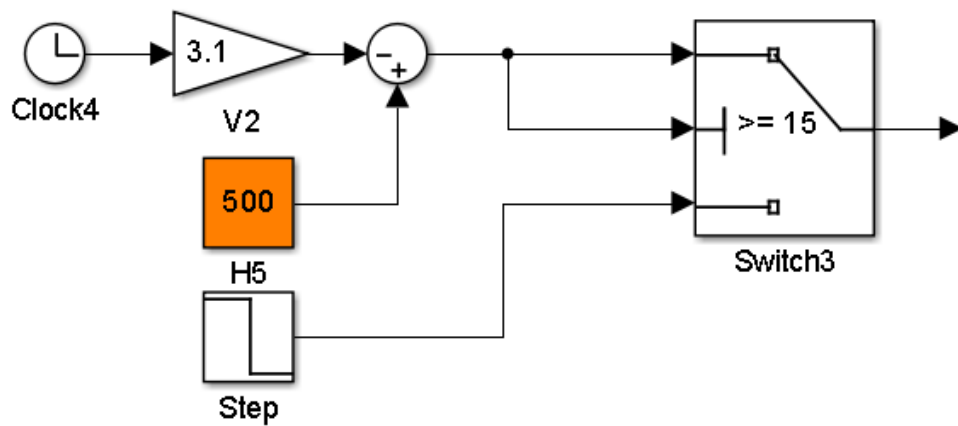


Рис. 1. Схема моделирования

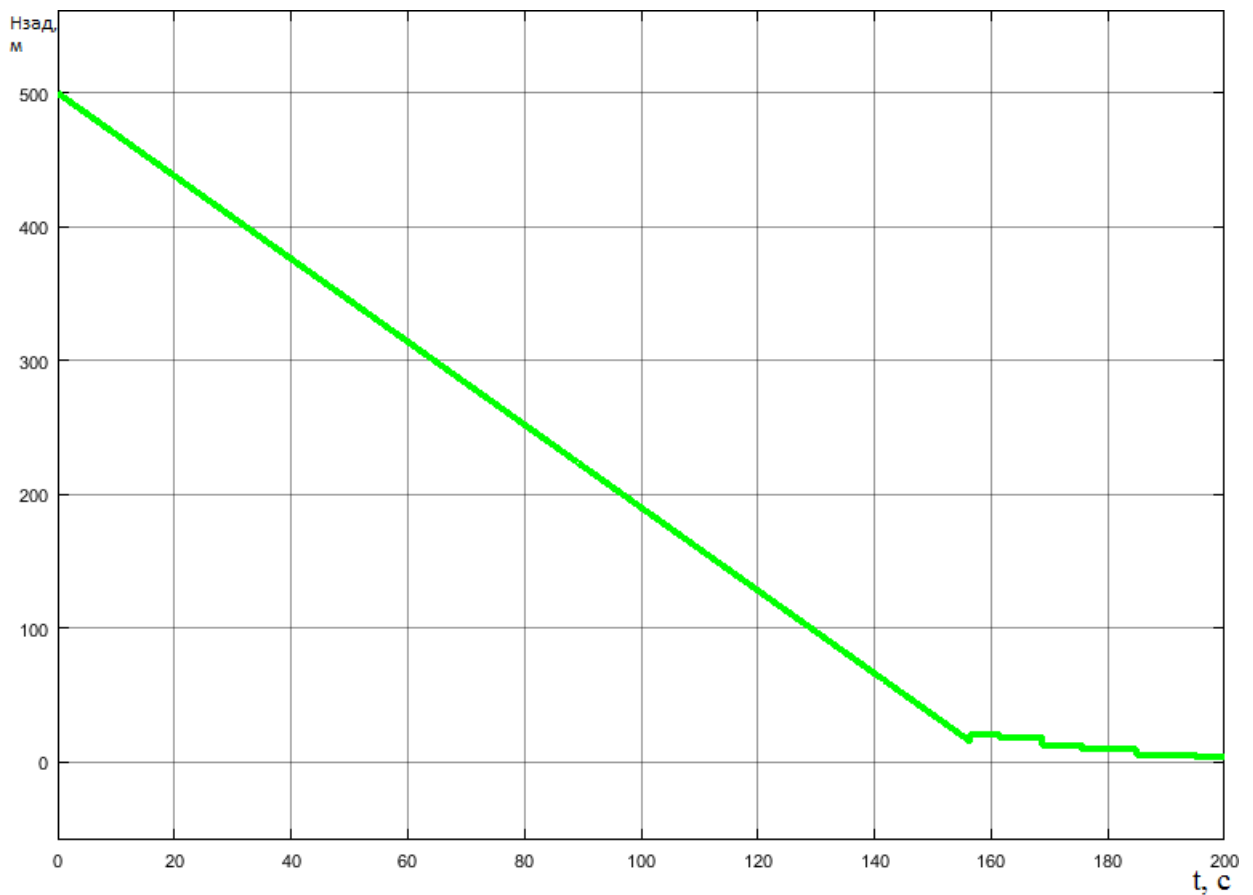


Рис. 2. Программа изменения высоты полёта при посадке

Увеличение заданной высоты на 156 с (рис. 2) связано с тем, что при посадке возникает перерегулирование по высоте, что приводит к преждевременному удару о подстилающую поверхность с последующим отскоком.

Задано значение  $d$  дистанции вдоль оси  $x$  попутного движения ЛА между

точками начала выравнивания и приземления. При моделировании это значение было принято равным 200 метров.

### Алгоритм расчета функции опасности

В работе [17] показана возможность вычисления количественного значения коэффициента опасности  $P_e$  продольного движения при посадке с учетом ошибок пилотирования с помощью формулы

$$P_e = \frac{M_0 [(y - H_{зад}) + K_1 (\theta - \theta_{зад}) V]^2}{1 + \frac{(x - x_e)^2}{d^2}}, \quad (2)$$

где  $K_1, M_0$  – весовые коэффициенты, нуждающиеся в уточнении;  $y$  – текущая высота горизонтального полёта перед снижением по глиссаде летательного аппарата (ЛА);  $H_{зад}$  – заданная высота горизонтального полёта перед снижением по глиссаде;  $\theta$  – текущий угол наклона траектории при снижении по глиссаде ЛА;  $\theta_{зад}$  – заданный угол наклона траектории при снижении по глиссаде;  $V$  – заданная скорость ЛА;  $x$  – текущая дальность до заданной точки приземления на взлётно-посадочной полосе (ВПП);  $x_e$  – заданная дальность до точки приземления на ВПП;  $d$  – значение дальности от точки начала выравнивания до точки приземления.

В отличие от (2), формула оценки опасности посадки с одновременным учётом ошибок пилотирования и действия ветра примет следующий вид:

$$P_6 = \frac{M_0[(y - H_{зад}) + K_1(\theta - \theta_{зад})V + K_2W_6]^2}{1 + \frac{(x - x_6)^2}{d^2}}, \quad (3)$$

где  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $M_0$  – весовые коэффициенты, нуждающиеся в уточнении;  $W_6$  – скорость вертикальной составляющей ветра.

В формуле (3) присутствуют три коэффициента, которые должны быть определены с помощью моделирования. Необходимо оценить значения указанных коэффициентов с помощью компьютерного моделирования при рассмотрении двух случаев. В первом случае учитываются только ошибки пилотирования. Во втором случае дополнительно рассматривается отклонение от траектории по глиссаде под действием вертикального ветра  $W_6$ , которое не учитывалось в формуле (2). Это является принципиальным отличием данной работы.

Следуя известному принципу нахождения функции риска, равной функции Беллмана, осуществим её оценку по шагам от точки приземления до точки начала выравнивания. Согласно этому принципу область допустимых неопасных отклонений (при переходе от конца до начала посадки) постепенно расширяется, как показано на рис. 3

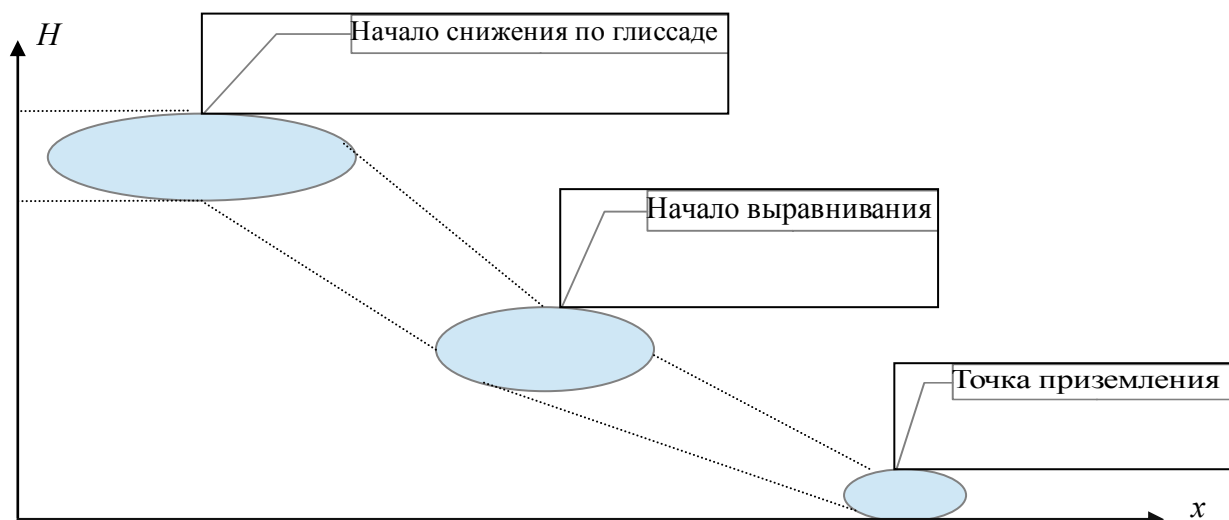


Рис. 3. Картина изменения области допустимой функции риска по появлению отклонений от глиссады от начала к концу посадки

Тогда, зная требования по допустимой вертикальной скорости в точке приземления, можно с помощью моделирования получить оценку допустимых отклонений по высоте сначала в точке выравнивания, а затем – в точке начала снижения по глиссаде, как при отсутствии, так и при наличии вертикального ветра. Именно эти отклонения станут граничными, превышение которых означает достижение существенных значений коэффициента опасности  $P_e \geq 0,5$ . Это позволит определить параметры  $M_0$ ,  $K_1$  и  $K_2$  в формуле (3).

Для реализации формулы (3) в среде Simulink сформирована схема, показанная на рис. 4.



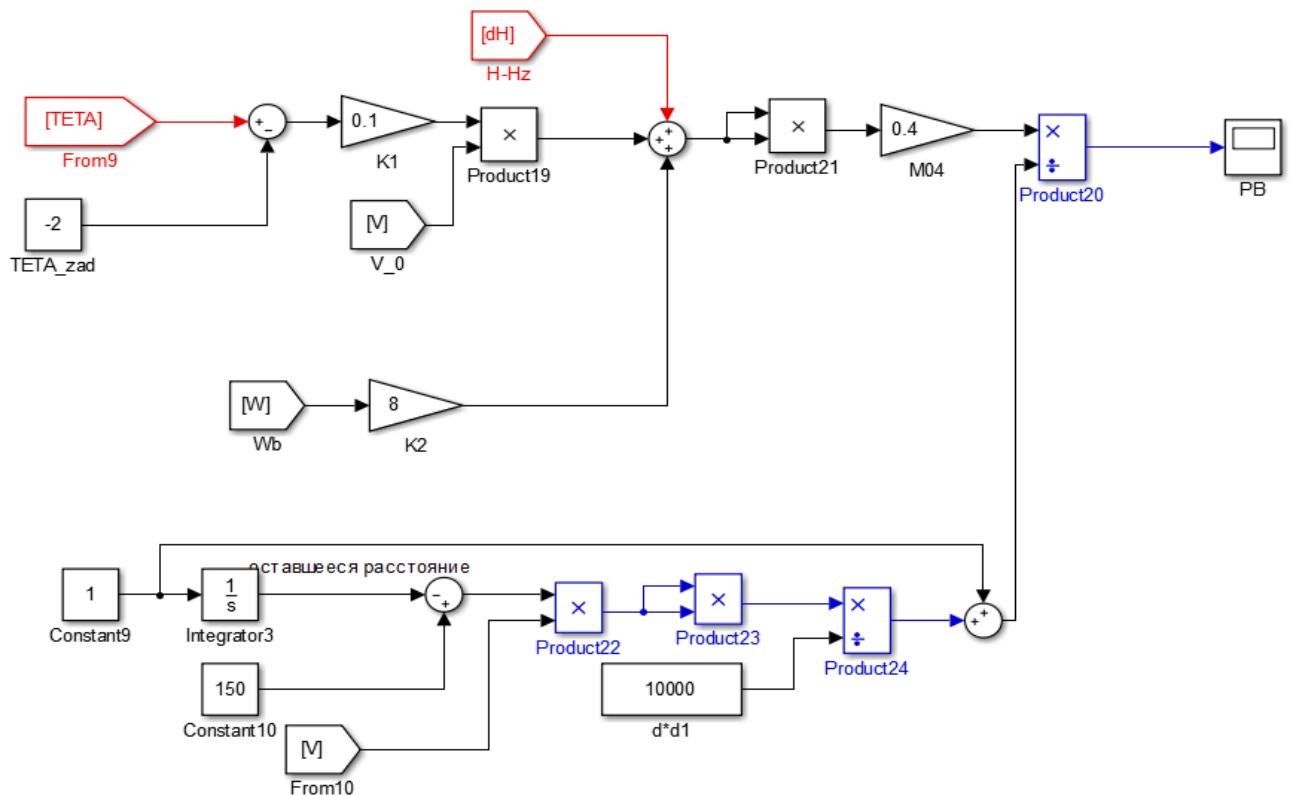


Рис. 4. Схема алгоритма вычисления коэффициента опасности в продольном движении при посадке

## Компьютерное моделирование процессов управления и контроля безопасности посадки

Для оценки параметров  $M_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  в формуле (3) проведён ряд этапов компьютерного моделирования при двух условиях выполнения вертикального полёта при снижении по глиссаде.

Первое условие характеризуется следующими параметрами:

- вертикальный ветер отсутствует ( $W_{\theta}=0$ );
- ошибка по углу наклона траектории отсутствует ( $\theta=0$ );
- существует начальная ошибка по высоте ( $Y - H_{зад}=100\text{м}$ );
- коэффициент опасности  $P_{\theta}$  к моменту начала выравнивания имеет большое

значение (например,  $P_{\theta} = 0.5$ ,  $x = x_{\theta}$ ).

При таких параметрах путём компьютерного моделирования получены следующие значения коэффициентов в формуле (3):  $M_0 = 0,005$ ;  $K_1 = K_2 = 0$ .

Ситуация возникновения ошибки по высоте в начале снижения вследствие негативного действия человеческого фактора, когда в особых критических ситуациях экипаж не успевает отреагировать и предотвратить аварию, была изучена в [17]. В данной работе дополнительно определены значения коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  формулы (3) при действии вертикального ветра.

При рассмотрении второго условия для оценки коэффициента опасности используем следующее рассуждение. Второе слагаемое в числителе формулы (3) есть прогнозируемое вертикальное отклонение, которое зависит от отклонения вертикальной скорости. Значит, коэффициент  $K_1$  по смыслу есть время интегрирования отклонения вертикальной скорости, составляющее несколько секунд. Путем моделирования установлено, что для принятых исходных данных ( $W_{\theta} = 0$ ,  $\theta = 0$ ,  $Y - H_{зад} = 100\text{м}$ ) значение  $K_1 = 4$  с. Результат моделирования траектории снижения по глиссаде при наличии начальных ошибок по высоте показан на рис. 5.

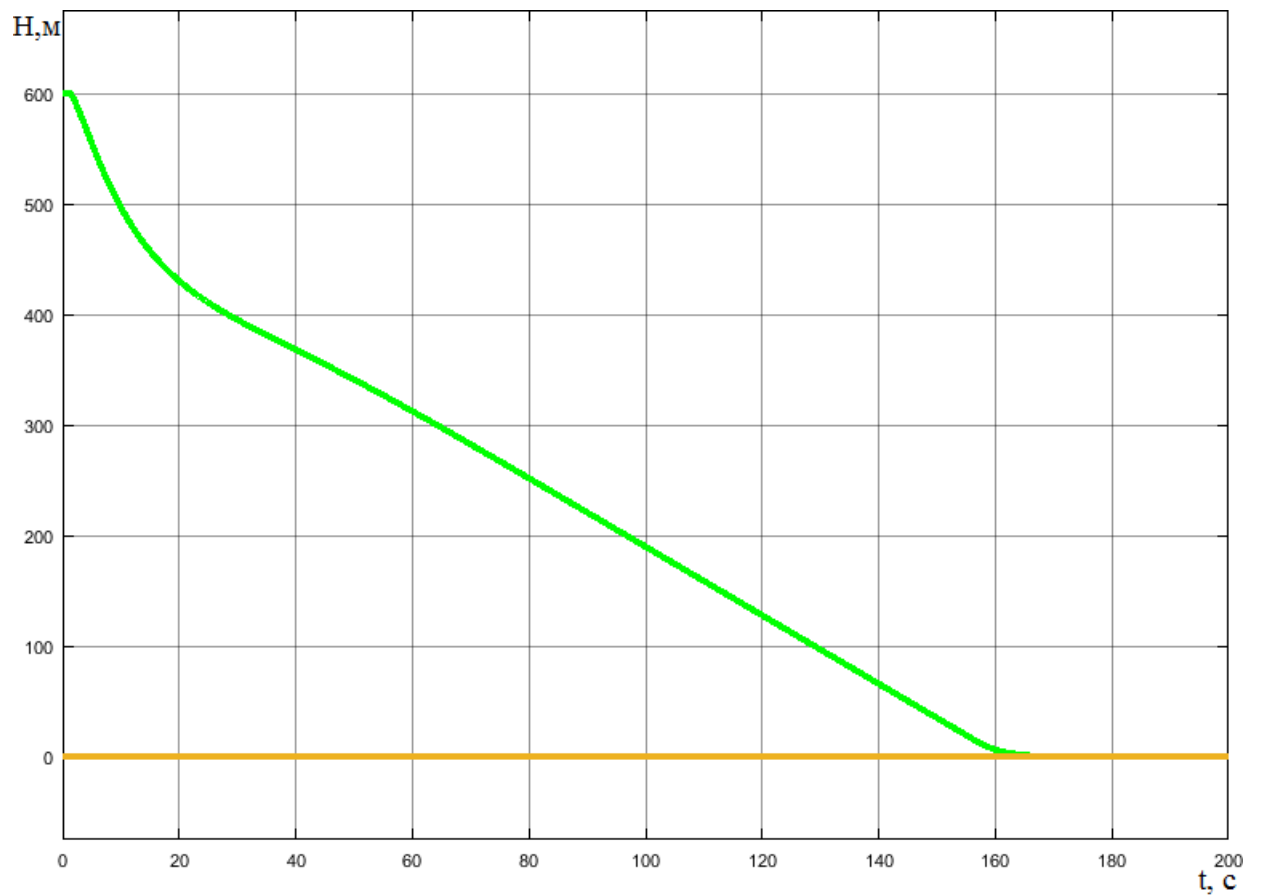


Рис. 5. График снижения по глиссаде без действия ветра в продольном канале

Соответственно, коэффициент опасности меняется согласно графику, показанному на рис. 6.

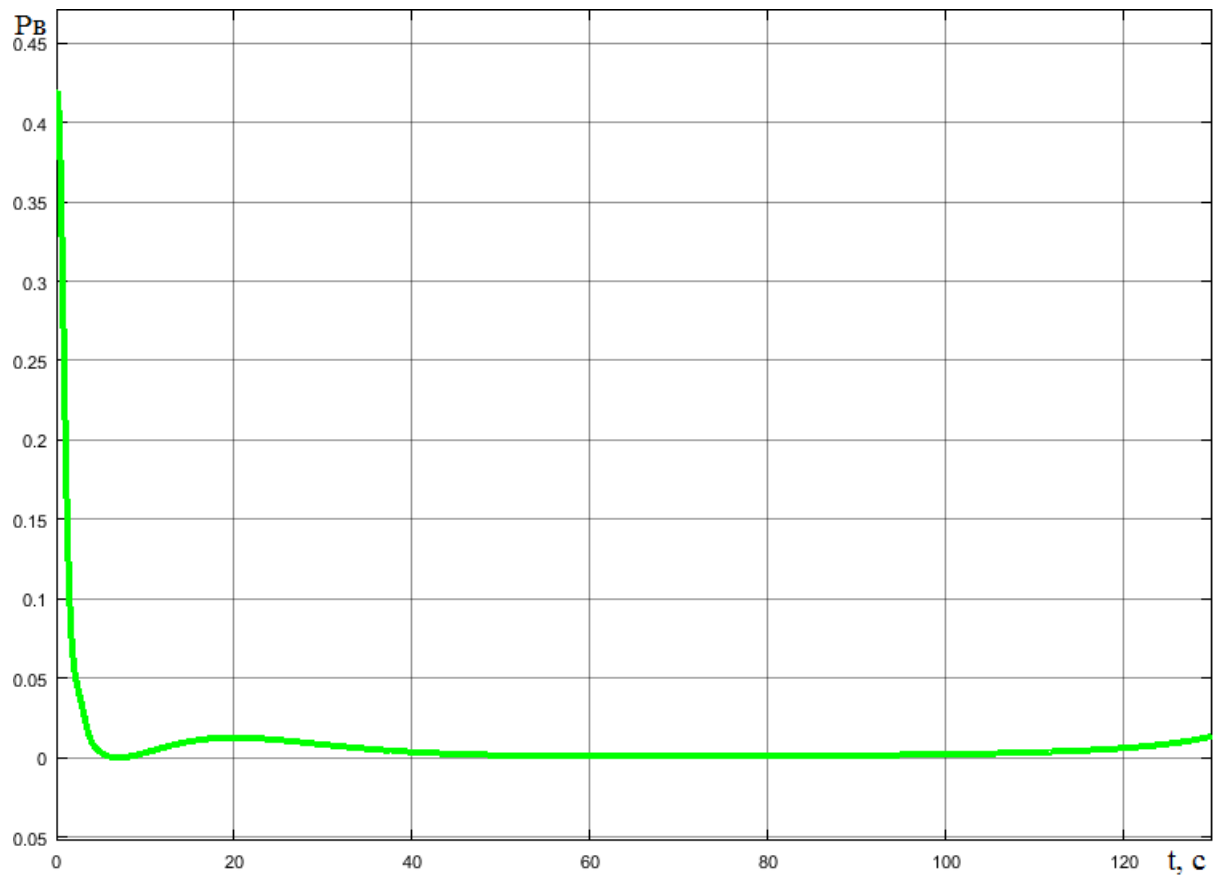


Рис.6. График изменения коэффициента опасности в продольном канале при наличии начальных ошибок по высоте.

Результат моделирования траектории снижения по глиссаде при наличии начальных ошибок по высоте и вертикальном ветре с параметрами управления, рассмотренными в [23], представлен на рис. 7.

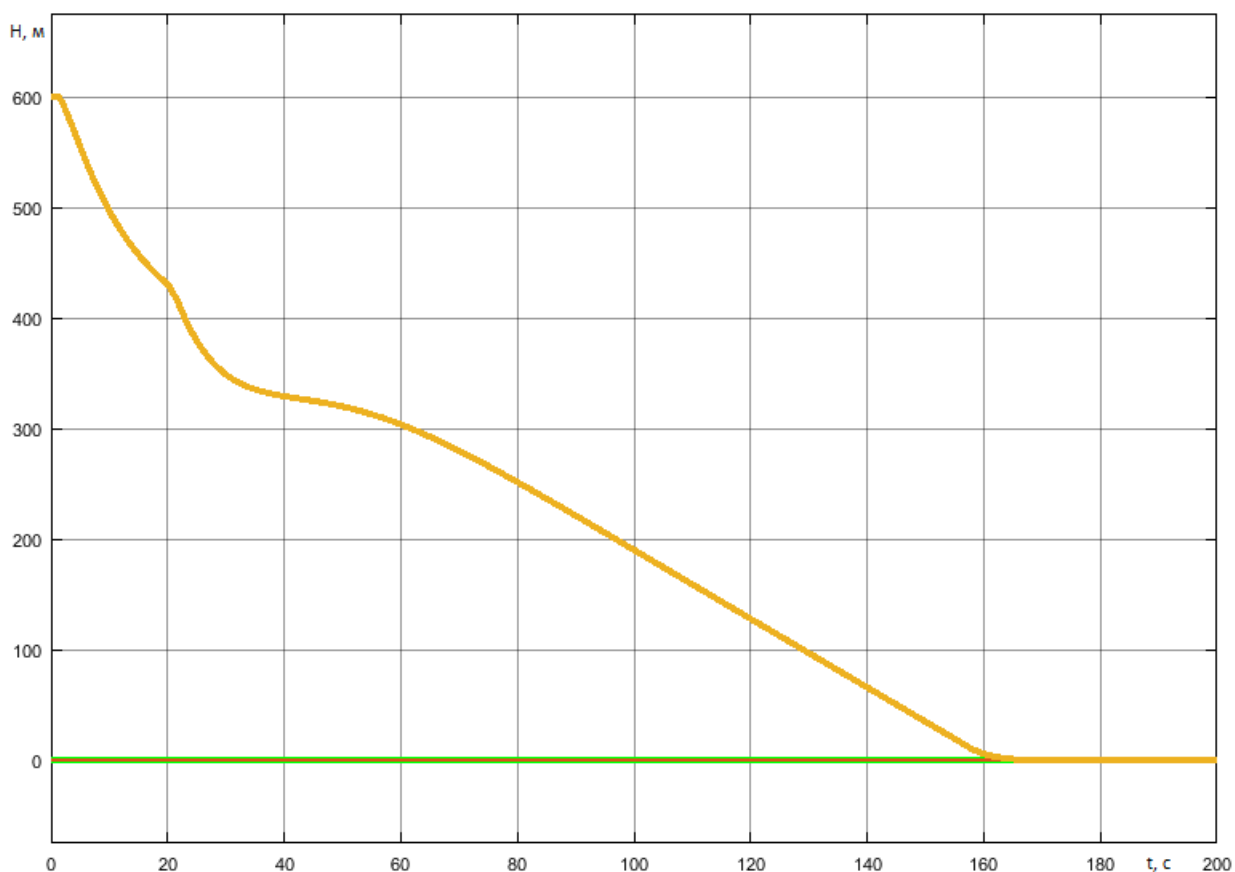


Рис. 7. График снижения по глиссаде при действии ветра в продольном канале

При фиксированном значении  $K_1$  и действии вертикального ветра  $W_в = 10$  м/с путем моделирования получено значение коэффициента  $K_2 = 8$ . Изменение коэффициента опасности  $P_в$  при одновременном действии вертикального ветра и ошибок пилотирования имеет вид, показанный на рис. 8.

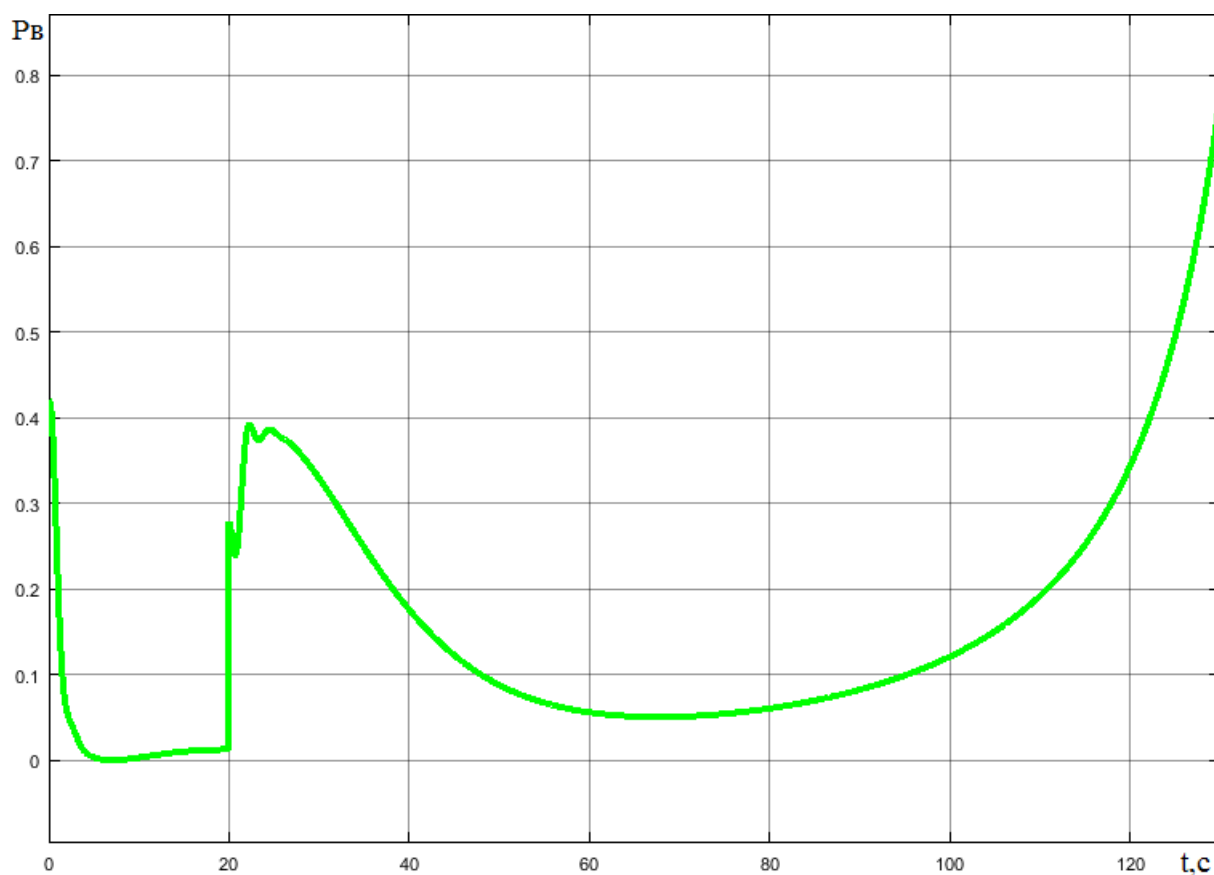


Рис. 8. График изменения коэффициента опасности в продольном канале при наличии начальных ошибок по высоте и наличии ветра.

Из рис. 8 видно, что поведение функции риска имитирует нарастание волнения и тревоги у лётчика по мере возникновения двух опасных полётных ситуаций при посадке – при задержке начала снижения по глиссаде и возникновении порыва вертикального ветра в середине снижения.

### Заключение

В результате проведенных исследований с помощью компьютерного моделирования уточнены масштабные коэффициенты при заданных параметрах движения ЛА по глиссаде в формуле определения коэффициента опасности с учетом начальных ошибок пилотирования и действия вертикального ветра.

Показано, что предложенная модель количественной оценки опасности при посадке имитирует нарастание тревоги у лётчика и её снижение при ликвидации опасных полётных ситуаций.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №18-08-00463*

*и №18-08-00079*

### **Библиографический список**

1. Boeing Commercial Airplanes. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959 – 2016, Aviation Safety, USA, Washington, July 2017, available at: <http://www.boeing.com/news/techissues/pdf/statsum.pdf>
2. Blin K., Bonnans F., Hoffman E., Zeghal K. Conflict resolution in presence of uncertainty: A case study of decision making with dynamic programming // Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Montreal, 2001. available at: [http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard\\_page/DOC\\_Conf\\_2001\\_004.html](http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/DOC_Conf_2001_004.html)
3. Михайлин Д.А. Экспертная оценка опасности полета группы воздушных судов при их сближении с помощью программы-диспетчера // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. № 5. С. 116 - 130.
4. Дугин Г.С. Применение современных информационных технологий для решения проблемы лётной безопасности // Вестник транспорта. 2014. № 2. С. 34 - 37.
5. Greenberg A.D., Small R.L., Zenyuh J.P., Skidmore M.D. Monitoring for hazard in flight management systems // European journal of operational research, 1995, no. 1, pp. 5 -

24.

6. Петунин В.И., Неугодникова Л.М. Ограничение и предупреждение опасных режимов при автоматическом управлении движением летательных аппаратов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. № 4 (65). С. 99 - 104.

7. Берестов Л.М., Харин Е.Г., Якушев А.Ф., Волков В.К., Кожурин В.Р., Сидоров Н.В., Калинин Ю.И., Полтавец В.А., Павлов М.М., Борис С.Ю., Вид В.И., Дедеш В.Т., Сапарина Т.П., Головнев В.Ф. Система поддержки экипажа в опасных ситуациях. Патент РФ №2128854 С1, 10.04.1999.

8. Солдаткин В.М. Методы и средства построения бортовых информационно-управляющих систем обеспечения безопасности полёта.- Казань: Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева, 2004. - 349 с.

9. Pritchett A.R., Vandor B., Edwards K. Testing and implementing cockpit alerting systems // Reliability engineering & system safety, 2002, no.75 (2), pp. 193 - 206, doi: 10.1016/S0951-8320(01)00094-1.

10. Kuchar J.K., Walton D.S., Matsumoto D.M. Integrating objective and subjective hazard risk in decision-aiding system design // Reliability engineering & system safety, 2002, no. 75 (2), pp. 207 - 214.

11. Абдрашитов Р.Г., Мартынов А.В. Посадка беспилотного летательного аппарата на неподготовленную ВПП // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2002. Т. 2. № 8. С.55 - 58.

12. Parunak H.V, Brueckner S.A., Odell J.J. Swarming coordination of multiple UAVS for collaborative sensing. Presented at the Second // 2ND AIAA Unmanned Unlimited



Systems Technologies and Operations Aerospace Land and Sea Conference and Workshop & Exhibit, San Diego, CA, 15-18 Sept. 2003, available at: <http://www.abcresearch.org/papers/AIAA03.pdf>

13. Kublanov M.S., Tsypenko V.G. Mathematical modelization system for aircraft flight dynamics simulation // International Aerospace Congress: Proceedings, 1994, no. 2, pp. 92 – 93.
14. Brooker P. Future air traffic management: quantitative en route safety assessment // The Journal of navigation, 2002, no. 2, pp.197 - 211.
15. Golpaswamy S., Hedrick J.K. Robust Adaptive Nonlinear Control of High Performance Aircraft // Proceedings of the American Control Conference, 1990, pp. 1279 - 1283.
16. Elliot J.R. NASA's Advanced Control Law Program for the F-8 Digital Fly-by-Wire Aircraft // IEEE Transactions on Automatic Control. Oct. 1977, vol. AC-22, no. 5, pp. 735 – 757.
17. Еремин А.И., Лебедев Г.Н., Чехов И.А. Система автоматизированного предупреждения опасных ситуаций при заходе самолёта на посадку перед началом снижения по глиссаде // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. № 226 (4). С. 90 – 100.
18. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк. Оптимальное управление и контроль безопасности поперечного движения воздушных и речных судов при пересечении их маршрутов // Новые технологии, мехатроника, автоматизация управления. 2012. № 12. С. 50 – 53.
19. Лебедев Г.Н., Тин Пхо Джо. Автоматизированная система управления и контроля безопасности попутного и поперечного движения группы воздушных судов

при заходе на посадку // Вестник Пензенского государственного университета. 2014. № 1. С. 72 – 80.

20. Михайлин Д.А., Аллилуева Н.В., Руденко Э.М. Сравнительный анализ эффективности генетических алгоритмов маршрутизации полета с учетом их различной вычислительной трудоемкости и многокритериальности решаемых задач // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90386>

21. Беллман Р. Динамическое программирование. - М.: Иностранная литература, 1960. - 400 с.

22. Летов А.М. Динамика полёта и управление. - М.: Наука, 1969. - 360 с.

23. Кузин А. Ю., Курмаков Д. В., Лукьянов А. В., Михайлин Д. А. Нейросетевая реализация автоматического управления безопасной посадкой беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2013. № 70. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=44540>