

УДК.629.7.015

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-76-84

## БЕЗОПАСНАЯ ПОСАДКА САМОЛЕТА С ОТКАЗАВШИМИ ДВИГАТЕЛЯМИ В УСЛОВИЯХ ВЕТРА

М.А. КИСЕЛЕВ<sup>1</sup>, С.В. ЛЕВИЦКИЙ<sup>2</sup>, В.А. ПОДОБЕДОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Публичное акционерное общество «Научно-производственная корпорация "Иркут"»,  
г. Москва, Россия

Отказ двигателя, согласно данным Управления инспекции по безопасности полетов Федерального агентства воздушного транспорта, стал причиной четырех из шести авиационных происшествий в 2017 году, в том числе двух катастроф. В целом за период с 2001 по 2017 год события, связанные с отказом двигателя, стали второй по частоте причиной возникновения авиационных происшествий (13 % авиационных происшествий и 12 % катастроф). Самые тяжелые последствия связаны с отказом двигателя на наиболее сложном и ответственном этапе полета – посадке. Так, например, именно отказ двигателя на предпосадочной прямой стал причиной катастрофы самолета L-410UVP-E20 RA-67047 в районе аэродрома Нелькан 15 ноября 2017 года. В данной статье рассматривается в некотором смысле предельная ситуация – посадка самолета со всеми отказавшими двигателями в условиях ветра. Для указанной ситуации предлагается методика расчета захода на посадку воздушного судна (ВС) в условиях ветра при отказе всех двигателей его силовой установки на аэродром, оборудованный дальним приводным радиомаяком (ДПРМ). Ключевыми особенностями названной методики являются, во-первых, отсутствие необходимости в привязке траектории к наземным ориентирам в районе аэродрома посадки и, во-вторых, простота синтеза и реализации управления самолетом на основе предлагаемой методики при посадке как в ручном, так и в директорном или автоматическом режимах. Для расчета захода на посадку с помощью предлагаемой методики экипажу необходимо знание только следующих величин: наивыгоднейшей скорости ВС в посадочной конфигурации, высоты пролета ДПРМ перед посадкой и шага спирали на высоте предпосадочного маневрирования. Содержание методики в статье проиллюстрировано результатами расчета захода на посадку в условиях ветра при отказе всех маршевых двигателей российского ближне-среднемагистрального самолета МС-21.

**Ключевые слова:** динамика полета, отказ двигателя самолета, моделирование, пилотирование, особые случаи полета, влияние ветра.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все ВС в соответствии с требованиями<sup>1</sup> создаются с учетом возможности выполнения полета при отказе части маршевых двигателей многодвигательной силовой установки, в том числе и в условиях ветра. Указанному вопросу посвящено множество исследований [1–12]. В то же время вопросам, касающимся пилотирования ВС на посадке в условиях ветра при отказе всех маршевых двигателей ВС, не уделяется должного внимания.

В работе [13] авторы привели описание методики расчета захода на посадку самолета с неработающей силовой установкой по методу контрольной высоты в стандартных атмосферных условиях. Очевидно, что в условиях реальной эксплуатации заметное влияние на точность расчета захода на посадку будет оказывать ветер. Для учета данного фактора при определении контрольной высоты ( $H_{\text{контр}}$ ) необходимо оценить изменение следующих параметров:

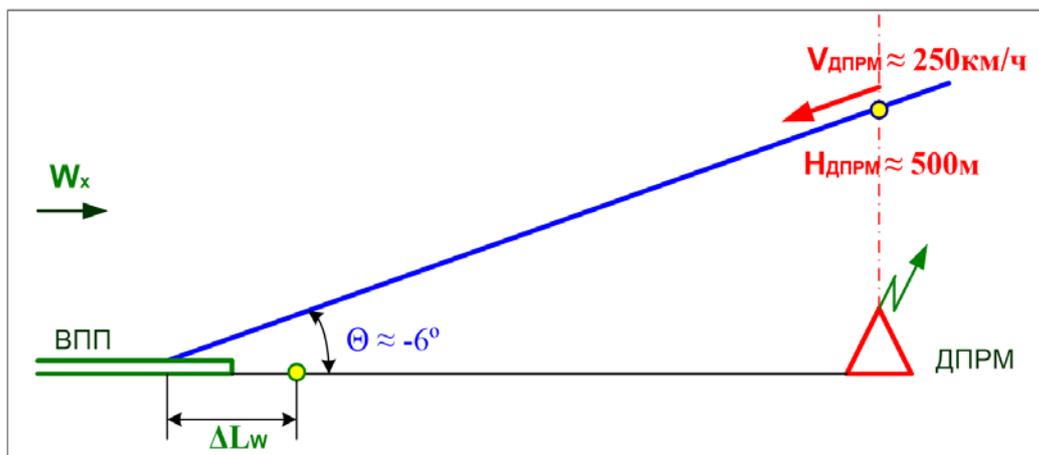
- контрольной высоты пролета над ДПРМ ( $H_{\text{ДПРМ}}$ );
- сноса самолета при выполнении спирали;
- сноса самолета на прямолинейных участках снижения.

<sup>1</sup> Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности гражданских самолетов транспортной категории. Межгосударственный авиационный комитет. М.: Авиаздат, 2013 г. 266 с.

## МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Уточнение контрольной высоты над ДПРМ

При наличии ветра точка касания земли в момент посадки сместится относительно расчетной на величину  $\Delta L_w$  (рис. 1). Для уточнения расчета необходимо изменить величину контрольной высоты над ДПРМ: увеличить  $H_{\text{ДПРМ}}$  на величину  $\Delta H_w$  при встречном ветре и уменьшить при попутном.



**Рис. 1.** К оценке влияния ветра  
**Fig. 1.** To assess the effect of wind

Величина сноса  $\Delta L_w$  определяется составляющей скорости ветра вдоль оси ВПП  $W_x$  и временем снижения  $t_{\text{сн}}$ :

$$\Delta L_w = t_{\text{сн}} \cdot W_x.$$

Время снижения определяется расчетной высотой и вертикальной скоростью снижения  $V_y$ , которая зависит от аэродинамического качества самолета в посадочной конфигурации при расчетной истинной скорости пролета ДПРМ  $V_{\text{ДПРМ}}$ :

$$t_{\text{сн}} = \frac{H_{\text{ДПРМ}}}{V_y} = \frac{H_{\text{ДПРМ}}}{V_{\text{ДПРМ}} \cdot \sin \theta_{\text{сн}}} \approx \frac{H_{\text{ДПРМ}}}{V_{\text{ДПРМ}}} \cdot K.$$

Отсюда высоту пролета ДПРМ необходимо скорректировать на величину

$$\Delta H_w = \Delta L_w \cdot \text{tg} \theta_{\text{сн}} = \frac{H_{\text{ДПРМ}}}{V_{\text{ДПРМ}}} \cdot W_x.$$

Итоговая расчетная формула уточнения  $H_{\text{ДПРМ}}$  для самолета МС-21 имеет вид

$$\Delta H_w \approx \pm W_x \cdot k_v,$$

где величина коэффициента  $k_v = 6,6 \dots 7,9$  определяется углом отклонения закрылков.

Так, например, в конфигурации  $\delta_3 = 10...18^\circ$  при встречном ветре  $W_x = +10$  м/с высоту пролета ДПРМ необходимо увеличить примерно на 70 м.

### Снос самолета при выполнении спирали

При выполнении разворотов на курс  $\Psi_{\text{пос}} + 180^\circ$  и обратно на посадочный  $\Psi_{\text{пос}}$  накапливается смещение самолета относительно ДПРМ на величину  $\Delta L_{\text{сп.}}^W$  (рис. 2 и 3). Данное смещение определяется скоростью ветра и временем выполнения спирали  $t_{\text{сп.}}$ .

На рис. 2 и 3 приведены результаты моделирования спиралей, выполненных в спокойной атмосфере и при наличии ветра  $W_x = 10$  м/с.

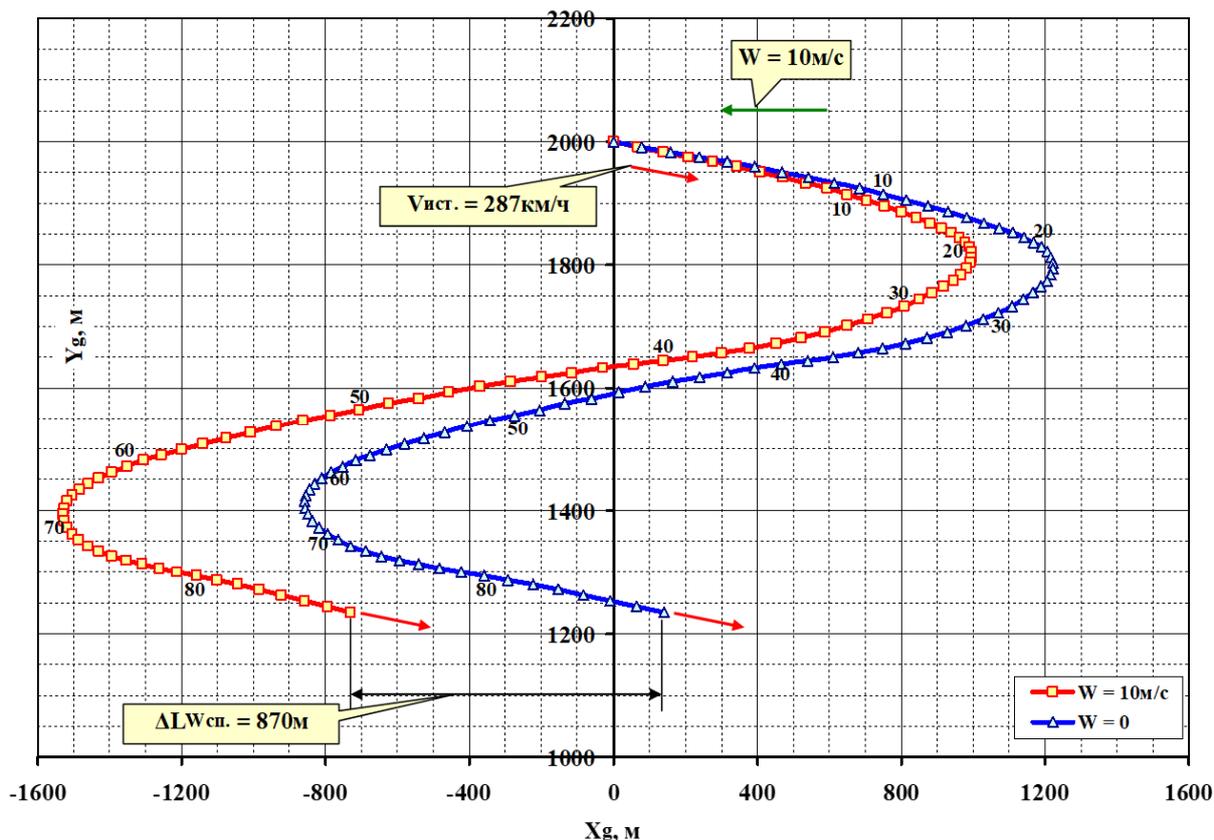


Рис. 2. Проекция траектории спирали на вертикальную плоскость  $Y_g O X_g$   
Fig. 2. The projection of the spiral path on the vertical plane  $Y_g O X_g$

Согласно описанию типовых маневров [14] время спирали определяется угловой скоростью разворота, которая зависит от истинной скорости и крена:

$$t_{\text{сп.}} = \frac{2\pi}{g} \cdot \frac{V}{\text{tg}\gamma},$$

где  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

При  $\gamma = 30^\circ$  итоговая формула для расчета времени [с] спирали имеет вид

$$t_{\text{сп.}} = 1,11 \cdot V.$$

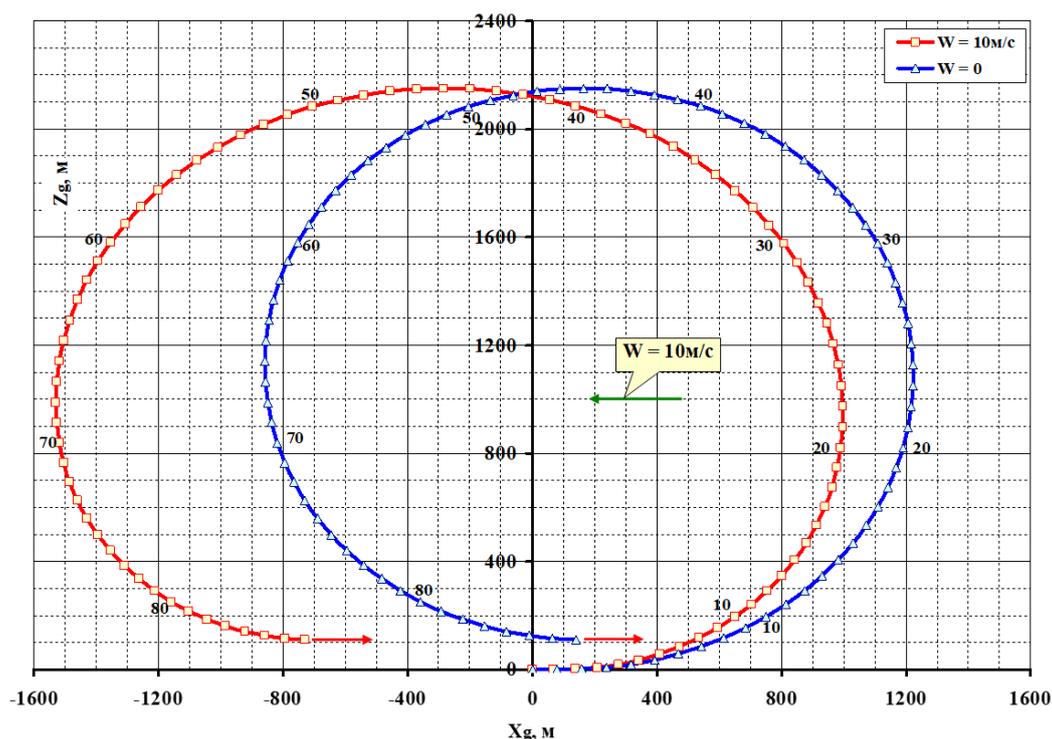


Рис. 3. Проекция траектории спирали на горизонтальную плоскость  $Z_g O X_g$   
Fig. 3. The projection of the spiral path onto the horizontal plane  $Z_g O X_g$

Смещение самолета за время спирали в направлении посадочного курса  $\Delta L_{W}^{сп.}$  составит

$$\Delta L_{W}^{сп.} = 1,11 \cdot V \cdot W_x.$$

Для парирования смещения самолета за время выполнения спирали и выхода на ДПРМ на расчетной высоте необходимо ввести дополнительную корректировку:

$$\Delta H_{контр}^{сп} = \Delta L_{W}^{сп} \cdot \frac{1}{K} = 1,11 \cdot \frac{V}{K} \cdot W_x.$$

Таким образом, минимальная высота  $H_{мин.}$ , при которой возможна реализация метода контрольной высоты в условиях ветра, должна определяться с учетом высотных поправок:

$$H_{мин} = H_{ДПРМ} + h_{сп} \pm (\Delta H_{W} + \Delta H_{контр}^{сп}).$$

### Снос самолета на прямолинейных участках снижения

Если начальная высота предпосадочного маневра больше минимальной, появляются два участка прямолинейного снижения с перепадом высот  $2\Delta H_{сн} = H_{нач} - H_{ДПРМ} - h_{сп}$ .

Смещение самолета за время снижения на  $2\Delta H_{сн}$  составляет:

$$\Delta L_{W}^{сн} = \frac{2\Delta H}{V_{ср}} \cdot K \cdot W_x,$$

где  $V_{ср} = 0,5(V_{ист} + V_{инд})/3,6$  – среднее значение между истинной и индикаторной скоростями на  $H_{нач}$ , выраженное в м/с.

Для парирования смещения самолета за время прямолинейного снижения необходимо ввести дополнительную корректировку по высоте:

$$\Delta H_{\text{контр}}^{\text{сн}} = \Delta L_{\text{W}}^{\text{сн}} \cdot \frac{1}{K} = \frac{2\Delta H}{V_{\text{ср}}} \cdot W_x.$$

В итоге при расчете контрольной высоты начала разворота на посадочный курс необходимо учесть полученные высотные поправки на влияние ветра:

$$H_{\text{контр.W}} = H_{\text{контр}} \pm (\Delta H_{\text{W}} + \Delta H_{\text{контр}}^{\text{сп}} + \Delta H_{\text{контр}}^{\text{сн}}),$$

где  $H_{\text{контр}} = \frac{H_{\text{нач}} + H_{\text{ДПРМ}}}{2}$  – контрольная высота при отсутствии ветра ( $W_x = 0$ ).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проиллюстрируем использование методики на примере расчета захода на посадку в условиях ветра с отказавшими двигателями перспективного отечественного ближне-среднемагистрального самолета МС-21.

Расчетные значения аэродинамического качества самолета типа МС-21 при различном положении закрылков и шасси (ШУ – шасси убрано; ШВ – шасси выпущено) с указанием наиболее выгодных скоростей приведены на рис. 4.

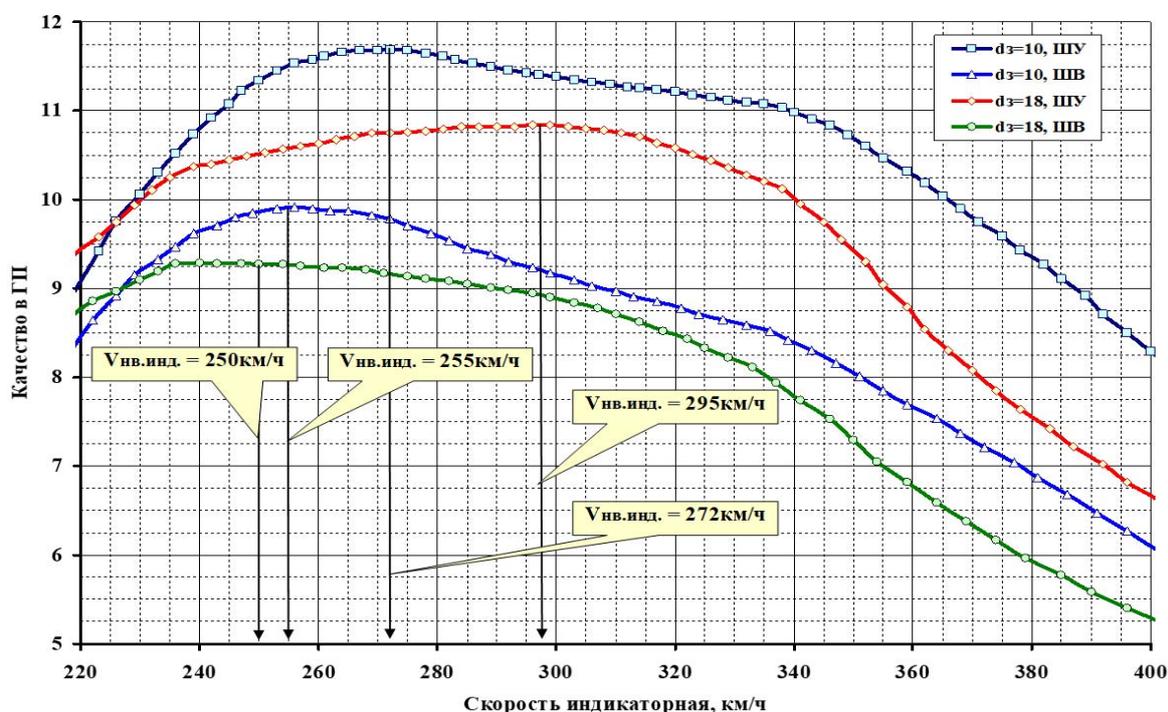


Рис. 4. Зависимость аэродинамического качества от скорости полета  
Fig. 4. The dependence of aerodynamic quality on flight speed

Ниже приведен пример расчета ветровых поправок для самолета в конфигурации, соответствующей положению закрылков  $\delta_z = 10^\circ$ , ШВ. Оптимальная индикаторная скорость на этапе захода на посадку 255...260 км/ч. Максимальное аэродинамическое качество  $K = 9,8$ .

Контрольные параметры снижения при отсутствии ветра:  $H_{ДПРМ} = 470$  м;  $h_{сп} = 770$  м;  $H_{нач} = 2000$  м;  $V_{ист} = 287$  км/ч – на начальной высоте.

Контрольная высота при отсутствии ветра:

$$H_{контр} = \frac{H_{нач} + H_{ДПРМ}}{2} = \frac{2000 + 470}{2} = 1235 \text{ м.}$$

Высотные поправки при встречном ветре  $W_x = +10$  м/с:

- высота над ДПРМ:

$$\Delta H_W \approx \pm 7 \cdot W_x = 7 \cdot 10 \approx +70 \text{ м;}$$

- высотная поправка на выполнение разворотов:

$$\Delta H_{контр}^{сп} = 1,11 \cdot \frac{V}{K} \cdot W_x = 1,11 \cdot \frac{287}{9,8 \cdot 3,6} \cdot 10 \approx +90 \text{ м;}$$

- высотная поправка на участки прямолинейного снижения:

$$\Delta H_{контр}^{сн} = \frac{2\Delta H}{V_{ср.}} \cdot W_x = \frac{(2000 - 470 - 770) \cdot 3,6}{(287 + 255) \cdot 0,5} \cdot 10 \approx +100 \text{ м.}$$

Таким образом, суммарная высотная поправка на встречный ветер  $W_x = +10$  м составит 260 м и, соответственно, контрольная высота  $H_{контр.W} = 1235 + 260 = 1495$  м.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из представленных материалов, рассмотренная методика учета влияния ветра при расчете захода на посадку со всеми отказавшими двигателями предлагает простой алгоритм действий экипажа, обеспечивающий вывод самолета с неработающей силовой установкой в безопасные условия посадки на любой аэродром с ДПРМ, в том числе в условиях ветра без необходимости привязки параметров движения самолета к заранее заданным наземным ориентирам.

Учет влияния ветра приводит к необходимости увеличения контрольной высоты при наличии встречного ветра и уменьшения контрольной высоты при наличии попутного ветра.

Так, например, наличие встречного ветра при заходе на посадку с отказавшими двигателями перспективного отечественного ближне-среднемагистрального самолета МС-21 приводит к необходимости увеличения контрольной высоты на 260 м с 1235 до 1495 м, то есть на 21 % от условий безветрия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Киселевич В.Г., Петров Ю.В., Ципенко В.Г.** Анализ особенностей летной эксплуатации самолета Ил-96т на взлете при отказе двигателя по результатам вычислительных экспериментов // Сборник XXVI научно-технической конференции по аэродинамике, 2015. С. 133–134.

2. **Киселевич В.Г.** Разработка рекомендаций по летной эксплуатации самолета Ил-96т при отказе двигателей на взлете / В.Г. Киселевич, М.С. Кубланов, В.Г. Ципенко, К.О. Чернигин // Научный вестник УВАУ ГА (И). 2014. №. 6. С. 17–23.

3. **Киселевич В.Г., Кубланов М.С., Ципенко В.Г.** Моделирование захода на посадку и посадки самолета Ил-76 с различными посадочными массами и при отказе двигателей // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 188 (2). С. 7–9.
4. **Киселевич В.Г.** Разработка рекомендаций по летной эксплуатации самолета Ил-96Т при прерванном взлете // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 211. С. 79–84.
5. **Киселевич В.Г.** Особенности летной эксплуатации самолета Ил-96Т при продолженном взлете // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 211. С. 128–131.
6. **Тихонов Д.В., Тихонов В.Н.** Прогноз степени опасности полетной ситуации при отказе двигателя на восходящих маневрах на основе расчетно-экспериментальных данных и экспертной оценки // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 212. С. 90–97.
7. **Кубланов М.С., Ципенко В.Г.** Исследование возможности посадки самолета ИЛ-96-300 в условиях низких коэффициентов сцепления и ограничений по боковой составляющей скорости ветра // Управление движением и навигация летательных аппаратов: сборник трудов XX Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов: Часть I. Самара, 14–16 июня 2017 г., Самар. нац. исслед. ун-т им. С.П. Королева. Самара: СНЦ РАН, 2018. С. 159–162.
8. **Желанников А.И., Ушаков С.А.** Влияния бокового ветра на взлет и посадку воздушных судов на параллельные полосы // материалы XXVIII научно-технической конференции по аэродинамике. Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, 2017. С. 128–129.
9. **Babych Ya.O., Bochelyuk A.O., Polukhin A.V.** Features of landing approach for aircraft in automatic and yoke control modes in conditions of vertical wind // Проблеми інформатизації та управління. 2017. Т. 4, № 60. С. 5–11.
10. **Гребенкин А.В., Костин С.А.** Автоматическая посадка самолета на ВПП переменного состояния в условиях сильного бокового ветра и отказа критического двигателя // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2016. № 12. С. 22–24.
11. **Мазур В.Н.** Управление самолетом при посадке в условиях изменяющегося продольного ветра / В.Н. Мазур, Е.А. Мельников, С.В. Хлгтян, А.Е. Ардалионова // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2015. № 10. С. 20–28.
12. **Кастерский С.М.** Оптимальное управление продольным движением самолета в режиме посадки при наличии ветра // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10, № 4. С. 10–14.
13. **Kiselev M.A., Levitsky S.V., Podobedov V.A.** Reckoning technique of passenger airplane approach procedure in case of all main engines failure // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 4. С. 91–99.
14. **Левицкий С.В., Свиридов Н.А.** Динамика полета. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 527 с.

## SAFE ENGINE-OUT LANDING OF A PASSENGER PLANE UNDER THE WIND CONDITIONS

Mikhail A. Kiselev<sup>1</sup>, Sergey V. Levitsky<sup>2</sup>, Vladimir A. Podobedov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

<sup>2</sup>JSC Irkut Corporation, Moscow, Russia

### ABSTRACT

The engine failure, according to the flight safety inspection of the Federal Air Transport Agency, caused 4 of 6 aviation accidents in 2017, including 2 air disasters. In general, from 2001 to 2017, events related to the engine failure became the second most frequent cause of aviation accidents (13% of aviation accidents and 12% of air disasters). The worst consequences are associated with the

engine failure at the most difficult and crucial stage of the flight - landing. For example, it was the engine failure on the final approach that caused the crash of the L-410UVP-E20 RA-67047 aircraft near the Nelkan airfield on November 15, 2017. The article discusses a limiting situation in some sense – the landing of an aircraft with all failed engines under the wind conditions. The authors have proposed for this situation a methodology of calculating the landing approach of an aircraft under the wind conditions in case of failure of all engines of its power plant to an aerodrome equipped with an outer marker. The key features of such methodology are, firstly, the absence of necessity to link the path to the landmarks in the landing aerodrome area, and, secondly, the simplicity of the synthesis and the implementation of the aircraft control based on the proposed methodology during landing in both manual and director or automatic modes. To calculate the approach using the proposed methodology, the crew only needs to know the following values: the minimum drag airspeed on final approach, the height of the flight over an outer marker before landing and spiral approach leg. The content of the methodology in the article is illustrated by the results of the approach calculation when all of the main engines of the Russian short-medium-range MS-21 aircraft fail under the wind conditions.

**Key words:** flight dynamics, aircraft engine failure, modeling, piloting, abnormal situations in flight, wind effect.

## REFERENCES

1. **Kiselevich, V.G., Petrov, Yu.V. and Tsipenko, V.G.** (2015). *Analiz osobennostey letnoy ekspluatatsii samoleta IL-96T na vzlete pri otkaze dvigatelya po rezultatam vychislitelnykh eksperimentov* [Analysis of the characteristics of the flight operation of the Il-96T at take-off in case of engine failure based on the results of computational experiments]. *Sbornik XXVI nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po aerodinamike* [Collection of Scientific Papers of: XXVI Scientific and Technical Conference on Aerodynamics], pp. 133–134. (in Russian)
2. **Kiselevich, V.G., Kublanov, M.S., Tsipenko, V.G. and Chernigin, K.O.** (2014). *Development of flight operation recommendations of il-96t aircraft with engine failure at takeoff*. *Nauchnyy vestnik UVAU GA (I)* [The Scientific Bulletin of The Ulyanovsk Civil Aviation Institute], no. 6, pp. 17–23. (in Russian)
3. **Kiselevich, V.G., Kublanov, M.S. and Tsipenko, V.G.** (2013). *Modeling of approach and landing of plane Il-76 with different landing masses and failures of engines*. *The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, no. 188, pp. 7–9. (in Russian)
4. **Kiselevich, V.G.** (2015). *The development of flight operation recommendations for IL-96T at aborted take-off*. *The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, no. 211, pp. 79–84. (in Russian)
5. **Kiselevich, V.G.** (2015). *Peculiarities of IL-96t flight operation at prolonged take-off*. *The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, no. 211, pp. 128–131. (in Russian)
6. **Tikhonov, D.V. and Tikhonov, V.N.** (2015). *Forecast of flight severity situation with an engine failure on the ascending maneuvers based on computational-experimental data and expert judgement*. *The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, no. 212, pp. 90–97. (in Russian)
7. **Kublanov, M.S. and Tsipenko, V.G.** (2018). *Issledovaniye vozmozhnosti posadki samoleta IL-96-300 v usloviyakh nizkikh koeffitsiyentov stsepleniya i ogranicheniy po bokovoy sostavlyayushchey skorosti vetra* [The research of the possibility to land the Il-96-300 aircraft under conditions of low friction coefficient and limiting the cross component of wind]. *Upravleniye dvizheniyem i navigatsiya letatelnykh apparatov: sbornik trudov XX Vserossiyskogo seminaru po upravleniyu dvizheniyem i navigatsii letatelnykh apparatov* [Collection of proceedings of Russian discussion group of air traffic control and navigation], part 1, pp. 159–162. (in Russian)
8. **Zhelannikov, A.I. and Ushakov, S.A.** (2017). *Vliyaniya bokovogo vetra na vzlet i posadku vozдушnykh sudov na parallelnyye polosy* [Cross wind influence on the take-off and landing of aircraft on parallel runways]. *Sbornik Materialov XXVIII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po aerodinamike. Tsentralnyy aerogidrodinamicheskiy institut im. prof. N.Ye. Zhukovskogo* [Collection of pa-

pers of XXVIII scientific and technological conference on aerodynamics. Zhukovsky Central aerodynamic Institute], pp. 128–129. (in Russian)

**9. Babych, Ya.O., Bochelyuk, A.O. and Polukhin, A.V.** (2017). *Features of landing approach for aircraft in automatic and yoke control modes in conditions of vertical wind shear. Problemi informatizatsii ta upravlinnya* [Problems of informatization and control], vol. 4, no. 60, pp. 5–11. (in Ukraine)

**10. Grebenkin, A.V. and Kostin, S.A.** (2016). *Avtomaticheskaya posadka samoleta na VPP peremennogo sostoyaniya v usloviyakh silnogo bokovogo vetra i otkaza kriticheskogo dvigatelya* [Automatic landing of the aircraft on a variable conditions runway with strong side wind and critical engine failure]. *Trudy MIEA. Navigatsiya i upravleniye letatelnyimi apparatami* [Proceedings of Moscow Institute of Electromechanics and Automatics. Navigation and aircraft control], no. 12, pp. 22–24. (in Russian)

**11. Mazur, V.N., Melnikova, Ye.A., Khlgatyan, S.V. and Ardalionova, A.Ye.** (2015). *Upravleniye samoletom pri posadke v usloviyakh izmenyayushchegosya prodolnogo vetra* [Aircraft control during landing with variable longitudinal wind]. *Trudy MIEA. Navigatsiya i upravleniye letatelnyimi apparatami* [Navigation and aircraft control], no. 10, pp. 20–28. (in Russian)

**12. Kasterskiy, S.M.** (2012). *Longitudinal Plane Movement Optimal Control in the Landing Mode when Wind*. *Journal Information-measuring and Control Systems*, vol. 10, no. 4, pp. 10–14. (in Russian)

**13. Kiselev, M.A., Levitskiy, S.V. and Podobedov, V.A.** (2019). *Reckoning technique of passenger airplane approach procedure in case of all main engines failure*. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 22, no. 4, pp. 91–99. (in Russian)

**14. Levitskiy, S.V. and Sviridov, N.A.** (2008). *Dinamika poleta* [Flight dynamics]. Moscow: VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo [Zhukovsky Air Force Engineering Academy], 527 p. (in Russian)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Mikhail A. Kiselev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Aerodynamics, Design and Strength of Aircraft Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, m.kiselev@mstuca.aero.

**Sergey V. Levitskiy**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Lead Design Engineer, JSC Irkut Corporation, flamento@yandex.ru.

**Vladimir A. Podobedov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Chief Designer – Head of Aerodynamics, JSC Irkut Corporation, Vladimir.Podobedov@irkut.com.

Поступила в редакцию 30.04.2019  
Принята в печать 24.09.2019

Received 30.04.2019  
Accepted for publication 24.09.2019