

УДК 656.7.025: [519.21+519.61]

doi: 10.37657/vniipo.avpb.2024.83.26.002

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ОЦЕНКИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ В РАЙОН ЧС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАС

Евгений Сергеевич Михайлов¹, Андрей Игоревич Захаров², Евгения Андреевна Шишкина¹, Владимир Иванович Ершов¹

¹ Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

² Управление авиации и авиационно-спасательных технологий, Москва, Россия.

Аннотация. Статья посвящена вопросам обеспечения принятия обоснованного решения о применении беспилотных авиационных систем (БАС) при осуществлении доставки малогабаритных грузов в труднодоступные и особо опасные зоны чрезвычайных ситуаций. В частности, рассмотрен такой элемент обстановки, как оценка продолжительности доставки, носящей случайный характер. Показано, что продолжительность доставки малогабаритных грузов с использованием БАС целесообразно принять подчиненной распределению Эрланга. Представлены практические рекомендации по осуществлению ее оценки.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система, терпящие бедствие, доставка малогабаритных грузов, принятие решения, продолжительность доставки, распределение Эрланга

Для цитирования: Рекомендации по выполнению оценки продолжительности доставки грузов в район ЧС с использованием БАС / Е.С. Михайлов, А.И. Захаров, Е.А. Шишкина, В.И. Ершов // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2024. № 3 (21). С. 15–20. <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2024.83.26.002>.

RECOMMENDATIONS FOR ASSESSING THE DURATION OF CARGO DELIVERY TO THE EMERGENCY AREA USING THE UAS

Evgeniy S. Mikhailov¹, Andrey I. Zakharov², Evgeniya A. Shishkina¹, Vladimir I. Ershov¹

¹ All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.

² Department of Aviation and Aviation Rescue Technologies, Moscow, Russia.

Abstract. The article deals with the issue of ensuring the adoption of an informed decision on the use of unmanned aircraft systems (UAS) when delivering small-sized cargo to hard-to-reach and especially dangerous emergency zones. In particular, the element of environment such as the estimation of delivery duration, which is random has been considered. It is shown that it is advisable to consider the duration of delivery of small-sized cargoes using UAS subordinate to the Erlang distribution. There are also presented practical recommendations for the implementation of assessment of delivery duration.

Keywords: unmanned aircraft system, distressed, delivery of small-sized cargo, decision-making, delivery duration, Erlang distribution

For citation: Mikhailov E.S., Zakharov A.I., Shishkina E.A., Ershov V.I. Recommendations for assessing the duration of cargo delivery to the emergency area using the UAS // Aktual'nye voprosy pozharnoi bezopasnosti – Current Fire Safety Issues, 2024, no. 3, pp. 15-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2024.83.26.002>.

Введение

В МЧС России, как и в спасательных службах многих стран, все более широко применяют беспилотные авиационные системы (БАС). Наряду с решением таких задач, как разведка и мониторинг обстановки, контроль технического состояния объектов, их безопасности и функционирования, фото- и видеосъемка объектов и места чрезвычайной ситуации, БАС планируется использовать и для доставки малогабаритных грузов в труднодоступные и особо опасные зоны чрезвычайных ситуаций (ЧС) [1, 2]. К таким грузам, в первую очередь, относятся средства для оказания первой медицинской помощи, партии медикаментов или продуктов питания пострадавшим лицам, а также инструменты, оборудование и запасные части к нему для команд спасателей.

Принятие решения о выполнении доставки малогабаритных грузов в зону ЧС с использованием БАС связано с оценкой обстановки, одним из основных элементов которой является оценка продолжительности выполнения задачи. Особенностью выполнения доставки грузов с использованием БАС является то, что на нее влияет ряд трудноучитываемых факторов, вследствие чего ее продолжительность носит случайный характер. Это накладывает на ее оценку некоторые особенности, анализу которых посвящен дальнейший материал.

Аналитическая часть

Беспилотные авиационные системы, с помощью которых осуществляется доставка спасателям и пострадавшим оборудования, медикаментов и продуктов питания, должны иметь грузовые платформы и обладать приемлемыми возможностями по грузоподъемности и пространственно-временными характеристиками. Состав груза и направление воздушной доставки, а также порядок передачи полученной в ходе полета информации устанавливает руководитель штаба аварийно-спасательных работ в соответствии с принятым им решением.

Важную роль в организации выполнения рассматриваемой задачи играет оценка возможностей по реализации доставки. В первую очередь это относится к таким показателям, как время выполнения задачи, потребное количество беспилотных воздушных судов (БВС) и количество доставляемого груза за определенное время. Ввиду того, что процесс доставки грузов носит стохастический характер, указанные возможности целесообразно оценивать теми величинами, за которые не будут выходить их реальные значения с заданной гарантийной вероятностью α , в качестве которой обычно берутся величины 0,8, 0,85, 0,9, 0,95 или 0,99.

Время полета одиночного БВС $T_{\text{БВС}}$ при доставке груза может быть представлено величиной, состоящей из постоянной и случайной составляющей:

$$T_{\text{БВС}} = T_{\text{мин}} + \Delta T_{\text{БВС}},$$

где $T_{\text{мин}}$ – минимальное время полета БВС от взлета до сброса груза (посадки) при выполнении конкретного задания, определенное в соответствии с техническими характеристиками аппарата; $\Delta T_{\text{БВС}}$ – случайная составляющая времени полета БВС.

При потребности в доставке в район бедствия большого количества малогабаритных грузов выполнение задачи может производиться посредством осуществления последовательных полетов нескольких БВС, управляемых одним оператором. При этом предполагается, что запуск последующего БВС выполня-

ется после сброса груза предыдущим аппаратом или его посадки в районе доставки. После сброса груза дальнейший полет БВС целесообразно осуществить в автоматическом режиме возврата. Аналогичным образом может быть организован возврат БВС и в случае его посадки в районе доставки груза после его разгрузки и взлета.

Тогда время выполнения задачи по доставке грузов последовательными полетами k БВС определяется выражением:

$$T_{\text{БВС}} = kT_{\text{мин}} + \Delta T, \quad (1)$$

где ΔT – случайная составляющая времени выполнения доставки грузов последовательными полетами k БВС.

В зависимости от особенностей выполнения доставки случайная составляющая $T_{\text{БВС}}$ времени полета единичного БВС может иметь различные законы распределения. Зачастую [3] время движения транспортного средства между двумя пунктами принимают подчиненным нормальному закону распределения. Как показал анализ, с этим следует согласиться, если среднее время полета БВС $T_{\text{БВСср}}$ значительно превышает величину $T_{\text{мин}}$, и разность $\Delta T_{\text{ср}} = T_{\text{БВСср}} - T_{\text{мин}}$ больше трех величин среднеквадратического отклонения. Величина $T_{\text{БВСср}}$ определяется путем статистической обработки результатов эксперимента или практических полетов на выполнение задачи по доставке грузов в условиях, аналогичных условиям исследуемой ситуации.

Если же замыслом на доставку груза предусмотрена реализация варианта с минимальным временем полета БВС, то случайную составляющую продолжительности доставки $\Delta T_{\text{БВС}}$ целесообразно считать подчиненной экспоненциальному закону распределения по аналогии с временем обслуживания заявки, рассматриваемого в теории массового обслуживания [4]. В этом случае функция распределения вероятности $\Delta T_{\text{БВС}}$ имеет вид:

$$P_{\text{БВС}} = 1 - e^{-\frac{\Delta T_{\text{БВС}}}{\Delta T_{\text{ср}}}}.$$

Именно этот вариант и предусматривается реализовывать при доставке малогабаритных грузов в зону ЧС с использованием БАС.

При выполнении доставки грузов несколькими БВС, случайная величина ΔT , представляющая собой сумму k независимых случайных величин, распределенных по одному и тому же экспоненциальному закону, подчиняется распределению Эрланга k -го порядка [5, 6], функция вероятности которого для рассматриваемого случая принимает вид:

$$P_k(\Delta T) = 1 - e^{-\frac{\Delta T}{\Delta T_{\text{ср}}}} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\left(\frac{\Delta T}{\Delta T_{\text{ср}}}\right)^i}{i!}. \quad (2)$$

Тогда, время выполнения задачи по доставке грузов последовательными полетами k БВС определяется с использованием выражения (1), где случайная составляющая ΔT , в свою очередь, определяется с использованием выражения $\Delta T = \beta \Delta T_{\text{ср}}$, в котором величина β является решением уравнения (2) при приравнивании его правой части к значению гарантийной вероятности и замене выражения $\Delta T/\Delta T_{\text{ср}}$ на β :

$$\alpha = 1 - e^{-\beta} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\beta^i}{i!}. \quad (3)$$

Результаты численного решения уравнения (3) относительно величины β для различных значений α и k представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения $\beta = \Delta T / \Delta T_{cp}$ для различных α и k

Гарантийная вероятность α	Количество БВС k					
	1	2	3	4	5	6
0,80	1,609438	2,994308	4,279030	5,515046	6,720979	7,905993
0,85	1,897120	3,372442	4,723051	6,013537	7,266968	8,494653
0,90	2,302585	3,889720	5,322320	6,680783	7,993590	9,274674
0,95	2,995732	4,743865	6,295794	7,753657	9,153519	10,513035
0,99	4,605169	6,638353	8,405948	10,045118	11,604626	13,108485

Таким образом, продолжительность выполнения задачи по доставке грузов в зону ЧС с использованием БАС, которая на практике с гарантийной вероятностью α не будет превышена, рекомендуется определять по формуле

$$T = kT_{\text{мин}} + \beta \Delta T_{\text{cp}} \quad (4)$$

где величина β по значениям α и k берется из табл. 1.

Значения случайной составляющей времени выполнения доставки ΔT для различных сочетаний k и ΔT_{cp} при гарантийной вероятности $\alpha = 0,9$ представлены в табл. 2.

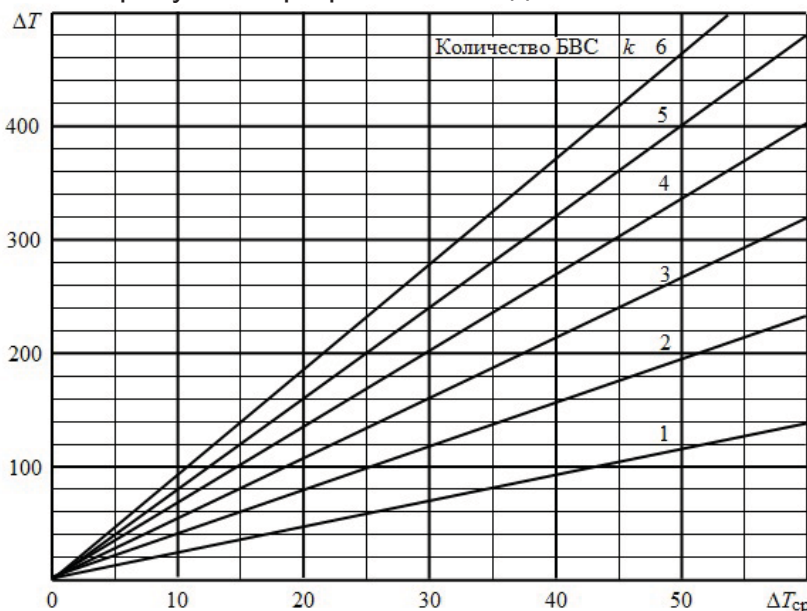
Таблица 2

Значения ΔT для различных k и ΔT_{cp} при гарантийной вероятности $\alpha = 0,9$

Кол-во БВС	Средняя величина превышения времени полета БВС над минимальным значением ΔT_{cp}							
	1	5	10	20	30	40	50	60
1	2,30	11,51	23,03	46,05	69,08	92,10	115,13	138,16
2	3,89	19,45	38,90	77,79	116,69	155,59	194,49	233,38
3	5,32	26,61	53,22	106,45	159,67	212,89	266,12	319,34
4	6,68	33,40	66,81	133,62	200,42	267,23	334,04	400,85
5	7,99	39,97	79,94	159,87	239,81	319,74	399,68	479,62
6	9,27	46,37	92,75	185,49	278,24	370,99	463,73	556,48

Примечание: результатные данные таблицы имеют такую же единицу измерения, как и величина ΔT_{cp} (секунды, минуты).

В целях демонстрации обзримости эта же информация представлена ниже на рисунке в графическом виде.



Зависимость ΔT от ΔT_{cp} и k для гарантийной вероятности $\alpha = 0,9$. Единицы измерения ΔT и ΔT_{cp} одни и те же (секунды, минуты)

Таким образом, при доставке малогабаритных грузов с применением БАС оценку возможностей по времени доставки рекомендуется осуществлять по величине, которая на практике не будет превышена с заданной гарантийной вероятностью α , например, равной 0,9. Эта величина определяется по формуле (4) с использованием информации, представленной в табл. 1 и 2.

Оценка потребного количества БВС для доставки заданного количества груза осуществляется посредством моделирования их загрузки с учетом технических характеристик.

Оценка потребного количества БВС для выполнения доставки за установленное время T осуществляется путем целочисленного деления $k = T/T_{\text{мин}}$ с округлением до меньшего значения и последующей проверкой по формуле (4). Если при проверке результат оказывается больше T , то k уменьшается на единицу и выполняется такая же проверка.

Заключение

Использование представленных в статье рекомендаций позволяет выполнить объективную оценку возможностей подразделений, укомплектованных беспилотными авиационными системами, по доставке малогабаритных грузов труднодоступные и особо опасные зоны ЧС, обеспечивая этим обоснованность принимаемых решений о применении БАС. Для обеспечения работоспособности рассмотренного метода следует постоянно вести статистическую обработку результатов выполнения практических полетов БАС в целях коррекции величины $\Delta T_{\text{ср}}$.

Список литературы

1. Раздел 2. Предложения по оснащению (дооснащению) МЧС ВРК с БЛА // Разработка тактико-технических требований к беспилотным летательным аппаратам, принимаемым на вооружение в МЧС России, шифр «Беспилотник»: Отчет о НИР / ВНИИПО; рук. Савин М.В., исполн.: Картеничев А.Ю., Осипов Ю.Н. и др. Москва: ВНИИПО, 2015. 151 с.
2. Современная практика применения беспилотных авиационных систем в сегменте «Поиск и спасение». Москва: АНО «Центр «АЭРОНЕТ», 2022. 109 с.
3. *Потапов П.Р.* Оперативное планирование и управление работой локомотивов и локомотивных бригад // Совершенствование технологии и условий железнодорожных перевозок: межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. В.И. Жукова. Новосибирск, 1995. С. 29–35.
4. *Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н.* Теория массового обслуживания: учебное пособие для вузов. Москва: Высшая школа, 1982. 256 с.
5. Распределение Эрланга k -го порядка. URL: <https://studfile.net/preview/5630620/page:7/> (дата обращения 20.11.2023).
6. Дистрибутив Erlang // Wikipedia. свободная энциклопедия: сайт. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Erlang_distribution (дата обращения 20.11.2023).

**Статья поступила в редакцию 01.07.2024;
одобрена после рецензирования 31.07.2024;
принята к публикации 19.08.2024.**

Михайлов Евгений Сергеевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела.

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихий-

ных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Захаров Андрей Игоревич – временно исполняющий обязанности заместителя начальника.

Управление авиации и авиационно-спасательных технологий, Москва, Россия.

Шишкина Евгения Андреевна – младший научный сотрудник; **Ершов Владимир Иванович** – кандидат военных наук, доцент, ведущий научный сотрудник.

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

Evgeny S. Mikhailov – Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of Department.

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.

Andrey I. Zakharov – Acting Deputy Head Department of Aviation and Aviation Rescue Technologies, Moscow, Russia.

Evgenya A. Shishkina – Junior Researcher; **Vladimir I. Ershov** – Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Leading Researcher.

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.