

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИНАМИЧНАТА УСТОЙЧИВОСТ НА ВЪНШНО
ПОЖАРОГАСИТЕЛНО УСТРОЙСТВО ОТ ТИПА “BAMBI BUCKET BB4453”,
ЗАКАЧЕНО ПОД ХЕЛИКОПТЕР AS532AL COUGAR
В ПОЛЕТ ЗА ГАСЕНЕ НА ПОЖАРИ**

Николай Загорски

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: nzagorski@space.bas.bg*

Ключови думи: *хеликоптер, външно пожарогасително устройство, динамична устойчивост*

Резюме: *В материала са изложени теоретични изследвания на динамичната устойчивост на външно пожарогасително устройство от типа “Bambi Bucket BB4453”, закачено под хеликоптер AS532AL Cougar в полет за гасене на пожари. Представени са зависимости за характеристиките на динамичната устойчивост на външното устройство от скоростта на установен хоризонтален праволинеен полет на хеликоптера и от параметрите на пожарогасителното устройство.*

**DYNAMIC STABILITY STUDY OF AN EXTERNAL FIRE EXTINGUISHING DEVICE
OF THE “BAMBI BUCKET BB4453” TYPE, ATTACHED TO AN AS532AL
COUGAR HELICOPTER DURING A FIREFIGHTING FLIGHT**

Nikolay Zagorski

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: nzagorski@space.bas.bg*

Keywords: *helicopter, external fire extinguishing device, dynamic stability*

Abstract: *The material presents theoretical studies of the dynamic stability of an external fire extinguishing device of the “Bambi Bucket BB4453” type, attached to an AS532AL Cougar helicopter during a firefighting flight. Dependencies of the characteristics of the dynamic stability of the external device on the speed of a steady horizontal straight flight of the helicopter and on the parameters of the fire extinguishing device are presented.*

Въведение

Транспортирането с хеликоптер на външни закачени товари отдавна е доказало своята ефективност в авиационната практика. По аналогичен начин в цял свят се прилага гасене на пожари с различни типове хеликоптери и различни типове външни пожарогасителни устройство от типа “Bambi Bucket” (“BB4453”, “BB5566”, “BBHL5000”и др.), производство на SEI Industries LTD, Канада [1]. В Република България в операции за гасене на пожари се използва един хеликоптер Ми-17 и няколко хеликоптера AS532AL Cougar с външно пожаро-гасително устройство “BB4453” с вместимост от 2 000 l. Но в същото време трябва да се отбележи, че прогнозирането на поведението на външното пожарогасително устройство при динамична промяна на параметрите на полета на хеликоптери на околната среда се извършва преди всичко на основата на опита на отделните летателни екипажи. Това е свързано с обстоятелството, че динамиката на поведение на външното пожарогасително устройство в полет на хеликоптера за гасене на пожари все още не е изследвано теоретично достатъчно задълбочено.

В настоящия материал се разглеждат теоретични подходи за изследване на динамиката на външното пожарогасително устройство в полет на хеликоптер AS532AL Cougar в полет за

гасене на пожари. Дадени са и някои от резултати от изследване на влиянието на параметрите на полета и на устройството върху характеристиките на динамичната устойчивост на "BV4453" в установен хоризонтален праволинеен полет.

1. Надлъжна устойчивост на външното пожарогасително устройство

При полет на хеликоптер за гасене на пожари се предполага, че ще съществува някакво постъпателно движение на външното пожарогасително устройство в хоризонталната равнина с определена скорост. В този смисъл, трябва да бъде изследвано влиянието на параметрите на такъв полет на хеликоптера и на параметрите на устройството, което в значителна степен определя безопасността на конкретния полет и на авиационната безопасност като цяло [2].

В условията на установен хоризонтален праволинеен полет на хеликоптер за гасене на пожар, външното пожарогасително устройство може да бъде изведено от положение на равновесие, например, при въздействие на порив (срез) на вятъра [3, 4]. Първоначално да разгледаме вертикален възходящ порив на вятъра. Международната организация за гражданска авиация – ICAO, е приела, че за порив на вятъра ще се счита всяка поява, или съществено изменение на посоката на вятъра, което продължава не повече от 28 s [5]. Да се възползваме от профила на порива, приведен в [3], за определяне на претоварванията от неспокоен въздух:

$$(1) \quad W_{y.g}(s) = \frac{W_{y.g}}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi s}{H}\right) \right],$$

където: $W_{y.g}$ е максимална скорост на вертикалния порив на вятъра;

s е разстоянието („дълбочина“) на проникване на порива;

H е дължината на участъка за нарастване на порива (разстоянието от началото на порива до неговата максимална стойност, измерена по посока на траекторията на полета).

При провеждане на теоретичните изследвания е по-удобно профилът на порива на вятъра да бъде представен като зависимост на скоростта на порива във функция от времето:

$$(2) \quad W_{y.g}(t) = 0,$$

ако $t < t_{s.gw}$,

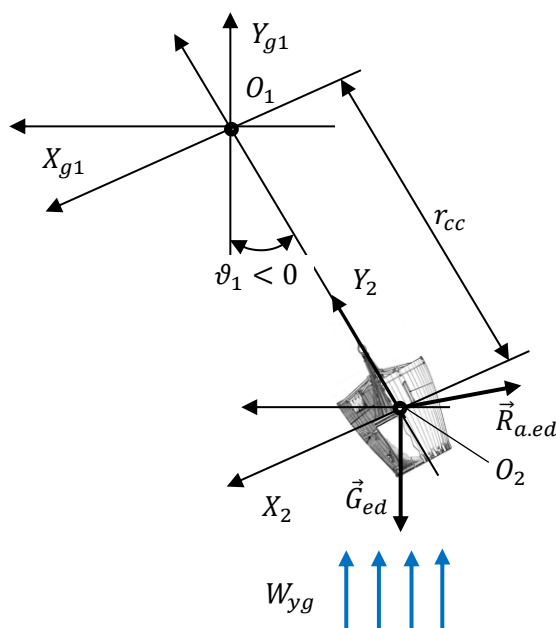
или $t > t_{s.gw} + \frac{2H}{V_{hf}}$;

$$(3) \quad W_{y.g}(t) = \frac{W_{y.g}}{2} \left[1 - \cos \frac{\pi V_{hf}(t - t_{s.gw})}{H} \right],$$

където: t е текущото време;

$t_{s.gw}$ е времето на начало на порива на вятъра;

V_{hf} е скоростта на установен хоризонтален праволинеен полет на хеликоптера.



Фиг. 1. Схема на въздействие на вертикален възходящ порив на вятър върху външно пожарогасително устройство

За провеждане на теоретичните изследвания са бяха приети следните параметри на порива на вятъра, съгласно таблиците в [5]: $H = 40 \text{ m}$; $W_{y.g} = 20 \text{ m/s}$.

2. Изследване на влиянието на параметрите на полета и на външното устройство за динамичната устойчивост на външното пожарогасително устройство

В случая най-важна е задачата за определяне на влиянието на параметрите на външното пожарогасително устройство и параметрите на полета на хеликоптера върху такива характеристики на динамичната устойчивост, като времето на преходния процес t_{tp} , абсолютното отклонение $A_{th.max}$, на ъгъла на тангаж на централния кабел ϑ_1 на външното устройство, продължителността на един цикъл от колебания T_f .

За решаване на така определените задачи бяха проведени следните теоретични изследвания, представени на фиг. 1. Точката O_1 , в която се закачва към хеликоптера централният кабел на външното устройство се движи хоризонтално с постоянна скорост V_{hf} . Приемаме, че O_1 достига тази скорост мигновено, т.е. в момент от време $t = 0$, тя вече има скорост V_{hf} . След някакво време ъгълът на отклонение ϑ_1 на централния кабел от вертикално положение (ъгъл на тангаж на кабела) ще се стабилизира. След това в зададен момент от време възниква контакт с вертикален възходящ порив на вятъра. В резултат ще се измени ъгълът на отклонение на централния кабел, като започва колебателен процес, който ще затихне след определено време. След провеждане на редица такива изчислителни експерименти за различни скорости на полета V_{hf} и параметри на външното пожарогасително устройство е определено тяхното влияние на характеристиките на колебателния процес.

Ако височината на полета се приеме за постоянна, т.е. изпълнява се хоризонтален праволинеен полет, то към изследваните параметри ще се отнася само скоростта V_{hf} . В качеството на изследвани параметри на външното устройство ще бъдат разгледани балистичният коефициент c_a , дължината на централния кабел r_{cc} и аеродинамичното качество K_{ed} на устройството.

Балистичен коефициент на външното пожарогасително устройство се нарича съотношението [6, 7]:

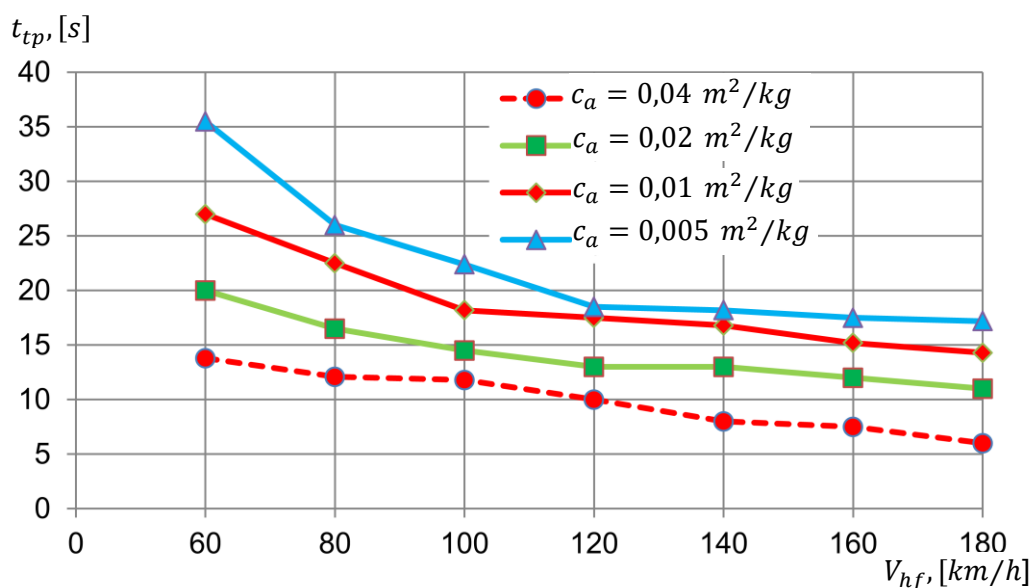
$$(4) \quad c_a = \frac{c_{x.a} S_{ed}}{m_{ed}},$$

където: $c_{x.a}$ е коефициент на силата на челно съпротивление на външното устройство;

S_{ed} е характерна площ на външното устройство;

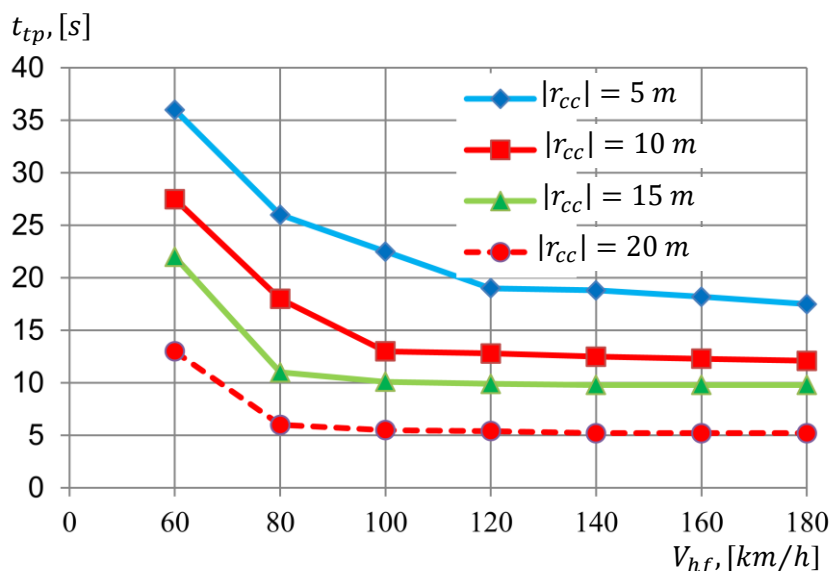
m_{ed} е масата на външното пожарогасително устройство.

При провеждане на теоретичните изследвания и изчисления беше прието, че c_a и K_{ed} се изменят слабо в процеса на колебателно движение, което се потвърждава от авиационната практика на летателните екипажи на хеликоптери.



Фиг. 2. Графики за влиянието на балистичния коефициент на външното пожарогасително устройство и на скоростта на полета на хеликоптера за времето на преходния процес след въздействие на вертикален порив на вятъра

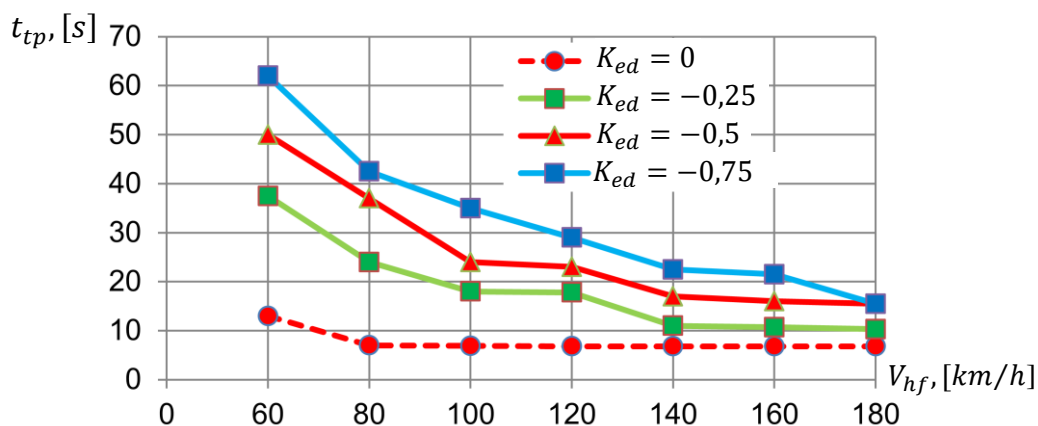
На фиг. 2 са представени резултатите от изчисленията по определяне на влиянието на балистичния коефициент c_a на външното пожарогасително устройство за времето на преходния процес t_{tp} след въздействие на порива на вятъра. При това беше прието, че аеродинамичното качество на външното устройство $K_{ed} = 0$, а дължината на централния кабел за закачване на устройството към хеликоптера е $r_{cc} = 10\text{ m}$. Анализът на получените графики показва, че с увеличаване на скоростта на хоризонталния полет и при увеличаване на балистичния коефициент на външното устройство намалява времето на преходния процес.



Фиг. 3. Графики за влиянието на дължината на централния кабел на външното пожарогасително устройство и на скоростта на полета на хеликоптера за времето на преходния процес след въздействие на вертикален срѝз на вятъра при $K_{ed} = 0$ и $c_a = 0,0025\text{ m}^2/\text{kg}$

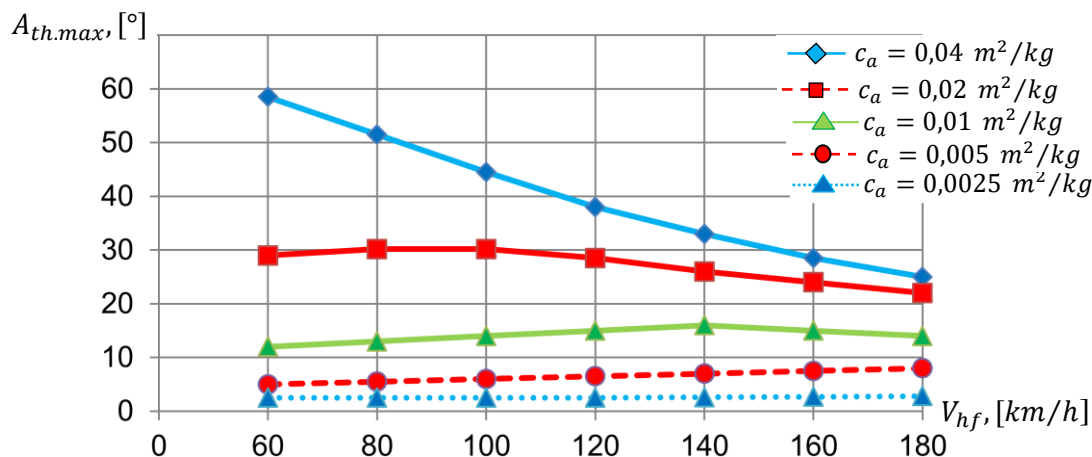
На фиг. 3 са представени графики на времето на преходния процес във функция от дължината на централния кабел за закачване на външното пожарогасително устройство към хеликоптера. Анализът на тези графики показва, че при увеличаване на дължината на кабела времето на преходния процес се съкращава.

Проведените изследвания също така показаха, че при увеличаване на стойностите на балистичния коефициент намалява влиянието на дължината на централния кабел за времето на преходния процес, а при увеличаване на дължината на кабела намалява влиянието на балистичния коефициент. При това при равни други условия, изменението на балистичния коефициент на външното пожарогасително устройство в по-голяма степен влияе на времето на преходния процес, отколкото изменението на дължината на кабела.



Фиг. 4. Графики за влиянието на аеродинамичното качество на външното пожарогасително устройство и на скоростта на полета на хеликоптера за времето на преходния процес след въздействие на вертикален порив на вятъра при $c_a = 0,0025\text{ m}^2/\text{kg}$

Влиянието на аеродинамичното качество на външното пожарогасително устройство K_{ed} за времето на преходния процес t_{tp} също така е свързано със стойността на балистичния коефициент c_a на устройството. При големи стойности на балистичния коефициент c_a аеродинамичното качество K_{ed} на външното устройство оказва слабо влияние на времето на преходния процес. При малки стойности на балистичния коефициент съществено нараства влиянието на аеродинамичното качество на външното устройство на времето на преходния процес, което е представено на фиг. 4.



Фиг. 5. Графики за абсолютното максимално отклонение във функция от скоростта на полета на хеликоптера при различни стойности на балистичния коефициент на външното устройство при дължина на централния кабел $|r_{cc}| = 7 \text{ m}$ и аеродинамично качество на външното устройство $K_{ed} = 0$

Да изследваме влиянието на параметрите на полета и на външното пожарогасително устройство на абсолютното отклонение $A_{th.max}$ при въздействие на възходящ порив на вятъра. Изчисленията показват, че увеличаването на балистичния коефициент c_a на външното устройство води до увеличаване на абсолютното отклонение $A_{th.max}$ на ъгъла на тангаж на централния кабел ϑ_1 , което е представено на фиг. 5. При това, увеличаването на скоростта на полета на хеликоптера при големи стойности на балистичния коефициент води до съществено намаляване на абсолютното отклонение $A_{th.max}$. От друга страна, при малки стойности на балистичния коефициент c_a на външното устройство, скоростта на полета на хеликоптера оказва слабо влияние на абсолютното отклонение $A_{th.max}$, а увеличаването на скоростта води до увеличаването на абсолютното отклонение $A_{th.max}$. При средни стойности на балистичния коефициент съществуват максимуми на отклонението във функция от скоростите на полета, които се преместват в посока на големите скорости на полета при намаляване на балистичния коефициент на устройството. По такъв начин, при средни стойности на балистичния коефициент $c_a \approx 0,01 \text{ m}^2/kg$ съществува скорост на полета на хеликоптера, при която абсолютното отклонение ще бъде максимално - $A_{th.max}$, т.е. това е най-неблагоприятната скорост на полета на хеликоптера с външно пожарогасително устройство от гледна точка на осигуряване на безопасност на полета при въздействие на вертикален възходящ порив на вятъра.

От физична гледна точка това може да бъде обяснено по следния начин. При малки скорости на полета на хеликоптера и въздействие на порив на вятъра, се получава сравнително малко нарастване на аеродинамичния момент от тангажа на външното пожарогасително устройство, което извежда устройството от състояние на равновесие. Нарастването на аеродинамичния момент се увеличава с увеличаването на скоростта на хоризонтален полет на хеликоптера, което е свързано основно с изменение на началното балансиращо положение на външното устройство преди въздействието на порива. При увеличаване на скоростта V_{hf} нараства ъгълът на тангаж ϑ_1 на устройството, увеличава се надлъжната аеродинамична сила, предизвикана от въздействието на порива на вятъра, която създава значителен момент спрямо точката на закачване към хеликоптера на централния кабел на външното пожарогасително устройство. В резултат на това обстоятелство, при увеличаване на скоростта на хоризонтален полет на хеликоптера постоянно се увеличава максималната стойност на ъгловата скорост на тангаж на пожарогасителното устройство, повлияна от въздействието на порив на вятъра. От друга страна, при увеличаване на скоростта

на хоризонтален полет на хеликоптера намалява разполагаемото време за въздействие на порива върху самото устройство, което води до намаляване на импулса, предаван на външното устройство от порив на вятъра. Противодействието на проявяващите се тенденции под въздействието на тези два фактора води до характера на полученото по-горе разпределение на ъглите на отклонение във функция от скоростта на установен хоризонтален праволинеен полет на хеликоптера.

Такъв извод може да бъде формулиран и за външни товари, при които балистичният коефициент съществено се различава от разгледания по-горе пример. При увеличаване на балистичния коефициент съществуващият максимум на отклонението $A_{th,max}$ се премества в областта на малките скорости на полета на хеликоптера, а при намаляване се премества в областта на големите скорости.

Заклучение

Изследванията и анализът на получените резултати показват, че характерът на влияние на параметрите на полета на хеликоптера и на външното пожарогасително устройство за характеристиките на колебателния процес на устройството по крен при въздействие на страничен порив на вятъра е аналогичен на характера на влияние на посочените параметри на характеристиките на колебателния процес на външното устройство по тангаж при действие на вертикален възходящ порив на вятъра, който беше описан по-горе.

Съществуват някои особености на страничната динамична устойчивост на външното пожарогасително устройство в полет на хеликоптер AS532AL Cougar за гасене на пожар. Например, времето на преходния процес t_{tp} и абсолютното отклонение A_{th} по ъгъл на отклонение на централния кабел при колебания по крен в резултат на въздействие на страничен порив на вятъра са значително по-големи, отколкото при колебания по тангаж поради въздействие на вертикален възходящ порив на вятъра, при равни други условия.

Литература:

1. SEI Industries LTD. | Engineered Solutions. [www.sei-ind.com /product-families](http://www.sei-ind.com/product-families)
2. Козловский, В.Б., М.С. Кубланов, Математическая модель полета вертолета с грузом на внешней подвеске // Научн. Вестник МГТУ ГА № 72. Сер. „Аэромеханика и прочность“. М.: Изд. МГТУ ГА, 2004. с. 5–9
3. Stuckey, R.A., Mathematical Modelling of Helicopter Slung-Load Systems, Air Operations Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory, DSTOTR1257, 2002
4. Загорски, Н. Безопасност на полета на хеликоптер с външно пожарогасително устройство и влияние на параметрите на устройството на някои от балансируващите характеристики на хеликоптера. Годишна международна научна конференция на ВВВУ „Г. Бенковски“, Долна Митрополия, 2022, ISSN: 2738-716X, с. 26–32
5. Flight safety. State of Flight Safety in the World. ICAO. 2013 Edition. H3C5H7. 54 p. www.icao.int
6. Козловский, В.Б. и др. Вертолет с грузом на внешней подвеске / В.Б. Козловский, С.А. Паршенцев, В.В. Ефимов; под ред. В. Б. Козловского. – Москва: Машиностроение, Машиностроение-Полет, 2008. – 302, ISBN 978-5-217-03415-4
7. Cicolani, L.S. and Kanning, G., Equations of Motion of Slung-Load Systems, Including Multilift Systems, NASA, 1992, NASA-TP-3280.