

МАТЕМАТИЧЕСКО ОПИСАНИЕ НА МОДЕЛА НА ТИПОВ ПОЛЕТ НА ХЕЛИКОПТЕР AS532AL COUGAR С ВЪНШНО ПОЖАРОГАСИТЕЛНО УСТРОЙСТВО ОТ ТИПА “BAMBI BUCKET 4453” 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, гасене на пожари

Резюме: В настоящия материал е представен аналитично описание на модела на хеликоптер с външно пожарогасително устройство в полет за гасене на пожари. Изследванията са свързани с използваните за тази цел хеликоптери от Военновъздушните сили на Република България AS532AL Cougar с външно пожарогасително устройство от типа Bambi Bucket “BB4453”.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE TYPE FLIGHT MODEL OF AN AS532AL COUGAR HELICOPTER WITH AN EXTERNAL FIRE EXTINGUISHING DEVICE OF THE “BAMBI BUCKET BB4453” TYPE FOR EXTINGUISHING FIRES

Nikolay Zagorski

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

Keywords: helicopter, external fire extinguishing device, fire fighting

Abstract: This article presents an analytical description of the model of a helicopter with an external fire extinguishing device in flight for extinguishing fires. The research is related to the helicopters used for this purpose by the Air Force of the Republic of Bulgaria AS532AL Cougar with an external fire extinguishing device of the Bambi Bucket “BB4453” type.

Въведение

Математическият модел на полета на хеликоптер за гасене на пожари с външно пожарогасително устройство, закачено на кабел, трябва да отговаря на някои от следните условия [1, 2]:

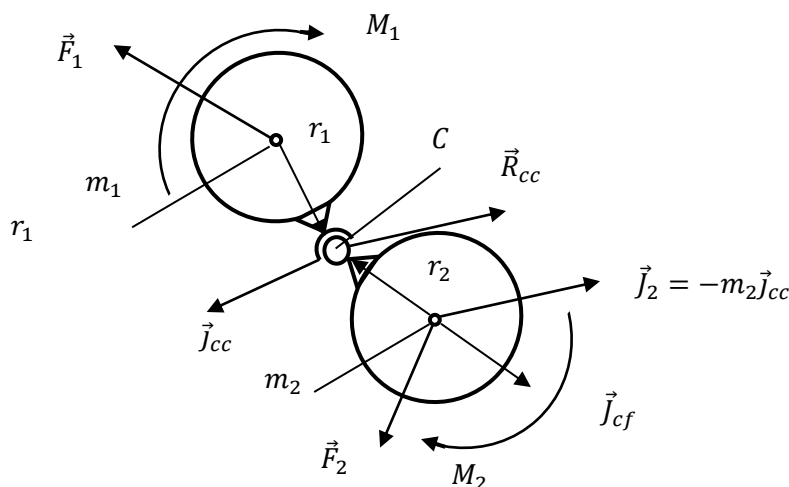
- да описва движението на външното устройство в 3-D пространството при големи премествания;
- да позволява създаването на модел на външното пожарогасително устройство с всички известни аеродинамични, геометрични, масови и инерционни характеристики;
- да отчита всички кръстосани връзки между степените на свобода на външното устройство;
- да отчита всички сили, действащи на устройството, включително инерционните сили;
- да позволява да се определят аеродинамичните сили и моменти, които действат на външното пожарогасително устройство в полет, при всички възможни съчетания на ъгъла на атака в диапазона $\alpha = (-180^\circ) - (+180^\circ)$ и на ъгъла на плъзгане $\beta = (-180^\circ) - (+180^\circ)$;
- да отчита силите, които създава хеликоптерът в полет, и тяхното влияние върху външното пожарогасително устройство, като при това в общия случай, точката за закрепване на

централния кабел към хеликоптера не трябва да съвпада с центъра на масите на хеликоптера, а точката за закрепване на кабела към външното устройство не трябва да съвпада с центъра на масите на самото устройство;

- да отчита еластичността на централния кабел за закрепване на външното пожарогасително устройство към хеликоптера;
- да отчита въздействието на неламинарния поток, най-малко във вид на единичен срез на вятъра във всяко направление;
- да позволява създаването на специализиран софтуер за работа със стандартен персонален компютър във вид на отделен модул, който да работи съвместно със специализиран софтуер, описващ динамиката на полета на хеликоптера.

1. Математически модел на динамиката на поведение на две тела, свързани помежду си с идеален сферичен шарнир

На фиг. 1 е представена динамика на поведението на две абсолютно твърди тела, свързати помежду си с идеален сферичен шарнир. На схемата тяло № 1 (m_1) е носещо тяло, а тяло № 2 (m_2) се намира под тяло № 1 (спрямо Земята) и е закачено тяло.



Фиг. 1. Схема на взаимодействие на две абсолютно твърди тела, свързани помежду си с идеален сферичен шарнир

По принцип, за съставяне на уравнения на движение на показаната система от две тела може да се използват методите на теоретичната механика и да се съставят уравнения на Лагранж от 2-ри ред. Но решаването на такива уравнения ще бъде твърде тежко, обемни и трудоемко още повече, че разглежданата система притежава голям брой степени на свобода, както и изисква описание на движението в големи премествания. Поради тези причини, за решаването на задачата е по-рационално да се използва принципът на Д'Аламбер [3, 4].

Доколкото двете тела са свързани помежду си чрез идеален сферичен шарнир, то взаимодействието между тях може да се опише само с една сила- $\vec{R}_{cc}$, приложена в шарнира. В резултат на това, уравненията за движение на системата от тези две тела може да се запише в следния вид, като силата $\vec{R}_{cc}$ се представи като външна сила за всяко от телата:

- уравнения на силите:

$$(1) \quad \begin{cases} m_1 \frac{d\vec{v}_1}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{R}_{cc}; \\ m_2 \frac{d\vec{v}_2}{dt} = \vec{F}_2 - \vec{R}_{cc}; \end{cases}$$

- уравнения на моментите:

$$(2) \quad \begin{cases} \frac{d\vec{K}_1}{dt} = \vec{M}_1 + \vec{r}_1 \times \vec{R}_{cc}; \\ \frac{d\vec{K}_2}{dt} = \vec{M}_2 + \vec{r}_2 \times \vec{R}_{cc}, \end{cases}$$

където: m_1 и m_2 са масите на двете тела;

$\vec{V}_1$ и $\vec{V}_2$ са скоростите на центъра на масите на двете тела;
 $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ са външните сили, действащи на телата;
 $\vec{K}_1$ и $\vec{K}_2$ са кинетичните моменти на телата;
 $\vec{M}_1$ и $\vec{M}_2$ са главните моменти от външните сили, действащи на телата;
 $\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$ са радиус-векторите на т.С (идеалния сферичен шарнир), спрямо центъра на масите на двете тела.

Движението на двете тела ще бъде разгледано като сложно движение, състоящо се от постъпателно и от относително движения. За тяло № 1 (на фиг. 1) за постъпателно движение на тялото ще се счита постъпателното движение на неговия център на масите спрямо някаква инерциална система за отчитане. За относително движение на тялото ще се счита въртеливото движение около неговия център на масите. По такъв начин, движението на тяло № 1 ще се описва със същите уравнения, които участват в системите уравнения (1) и (2).

За постъпателно движение на тяло № 2 ще се счита постъпателното движение на т.С, която представлява обща точка и за двете тела. За относително движение на тяло № 2 ще се счита въртеливото му движение около т.С. Трябва да се отбележи, че постъпателното движение на т.С може да бъде определено само с използването на т.С може да бъде определено само с използване на уравненията за движения на тяло № 1. Въртеливото движение на тяло № 2 може да бъде представено като движение на тяло около условно неподвижна точка С. Това въртене ще се извършва под действие на външна активна сила $\vec{F}_2$ и инерционната сила $\vec{J}_2$. Инерционната сила $\vec{J}_2$ ще възниква при ускорено преместване на точката на свързване на двете тела (т. С) и ще бъде приложена в центъра на масите на тяло № 2. Трябва да се отбележи, че Кориолисовата инерционна сила при този подход ще бъде равна на нула, защото тяло № 2 има постъпателно движение [5].

Силата $\vec{R}_{cc}$ няма да оказва влияние на въртеливото движение на тяло № 2, тъй като е приложена в точката на въртене и не създава момент спрямо тази точка (в този случай, рамото на сила $\vec{R}_{cc}$ е равно на нула). Размерът и посоката на сила $\vec{R}_{cc}$ ще зависят от силите, които действат на тяло № 2, сред които е и центробежната сила $\vec{J}_{cf}$, която възниква от въртеливото движение на тялото около точка С (фиг. 1). По такъв начин, системата уравнения за движението на тази система от две тела във векторна форма може да бъде записана по следния начин:

$$(3) \quad \begin{cases} m_1 \frac{d\vec{V}_1}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{R}_{cc}; \\ \frac{d\vec{K}_1}{dt} = \vec{M}_1 + \vec{r}_1 \times \vec{R}_{cc}; \\ \vec{R}_{cc} = \vec{F}_2 + \vec{J}_2 + \vec{J}_{cf}; \\ \frac{d\vec{K}_{2b}}{dt} = \vec{M}_2 + \vec{r}_2 \times \vec{F}_2 + \vec{r}_2 \times \vec{J}_2, \end{cases}$$

където $\vec{K}_{2b}$ е кинетичният момент на тяло № 2 спрямо точка С.

Така описаната система от две тела, свързани помежду си с идеален сферичен шарнир, могат да бъдат разглеждани като елементарна клетка за създаване на математически модел на система от повече от две тела, последователно свързани едно с други в някаква верига. Теоретично броят на елементите (телата) във веригата може да бъде неограничен. В същото време трябва да се отбележи, че могат да възникнат проблеми със създаването на устойчива диференциална система за числено интегриране. Въпреки това, този подход е подходящ и позволява да бъдат създавани модели за сложни движения на меката връзка за закачване на външното устройство при големи премествания. Например, след скъсване на централния кабел (меката връзка), при полет на хеликоптера с празно външно пожарогасително устройство от типа „Bambi Bucket“ и др.

2. Основни изисквания и допускания при съставяне на математически модел за полет на хеликоптер с външно устройство

За да бъде приложен описаният по-горе метод за определяне на движението на хеликоптера и на външното устройство като две абсолютно твърди тела, като начало е необходимо да бъдат въведени някои ограничения и да бъдат направени някои допускания:

- ъгловите премествания на централния кабел (меката връзка за закачване на външното устройство към хеликоптера) спрямо самото външно устройство са незначителни. В

този смисъл може да се счита, че кабелът и външното устройство представляват едно общо тяло „Кабел-външно устройство“;

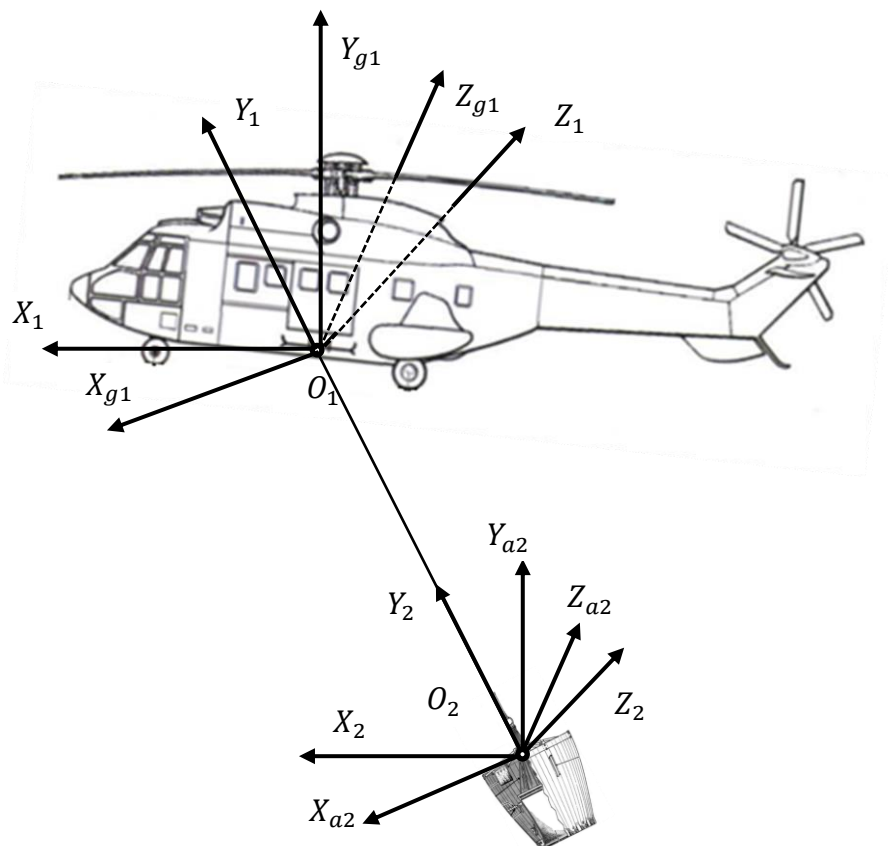
- хеликоптерът и външното устройство са свързани помежду си с идеален сферичен шарнир, разположен в точката на закрепване на кабела към хеликоптера;
- аеродинамичните характеристики на външното устройство се считат за известни и постоянни, т.е. не се отчитат нестационарните аеродинамични ефекти;
- не се отчита влиянието на индуктивния поток от основното витло върху външното устройство, защото преимуществено се разглежда хоризонтален полет на хеликоптера с външно пожарогасително устройство от типа „Bambi Bucket“;
- не се отчита влиянието на постоянна атмосферна турбулентност върху хеликоптера и външното устройство;
- приема се, че централния кабел притежава еластичност на опън, но се счита за абсолютно твърд при огъване, като винаги остава праволинеен.

За да бъде описана динамиката на поведение на външното пожарогасително устройство при полет на хеликоптера е необходимо да бъдат въведени допълнителни координатни системи.

3. Координатни системи на хеликоптера, на кабела за закачване и на външното устройство при съставяне на математически модел за полет на хеликоптер с външно устройство

На фиг. 2 са представени следните координатни системи на хеликоптера, на кабела за закачване на външното устройство към хеликоптера и на самото външно устройство:

- нормална координатна система на хеликоптера: $O X_g Y_g Z_g$;
- нормална координатна система в точката на закачване на външното устройство към хеликоптера: $O_1 X_{g1} Y_{g1} Z_{g1}$;
- свързана координатна система на кабела: $O_1 X_1 Y_1 Z_1$;
- свързана координатна система на външното устройство: $O_2 X_2 Y_2 Z_2$;
- скоростна координатна система на външното устройство: $O_2 X_{a2} Y_{a2} Z_{a2}$.



Фиг. 2. Координатни системи на хеликоптера, на централния кабел и на външното пожарогасително устройство

По-горе беше направено допускането, че централният кабел е закрепен в точката на закачване към хеликоптера чрез идеален сферичен шарнир [6]. Поради тази причина, положението на централния кабел (положението на свързаната координатна система на кабела $O_1X_1Y_1Z_1$) спрямо нормалната координатна система в точката на закачване $O_1X_{g1}Y_{g1}Z_{g1}$. Може да бъде описана по същия начин, както при описване на взаимното положение на координатните системи на хеликоптера $OXYZ$ и $OX_gY_gZ_g$, т.е. с помощта на ъглите на рискание ψ_1 , на тангаж ν_1 и на крен γ_1 .

4. Уравнения на динамика на поведение на външното пожарогасително устройство

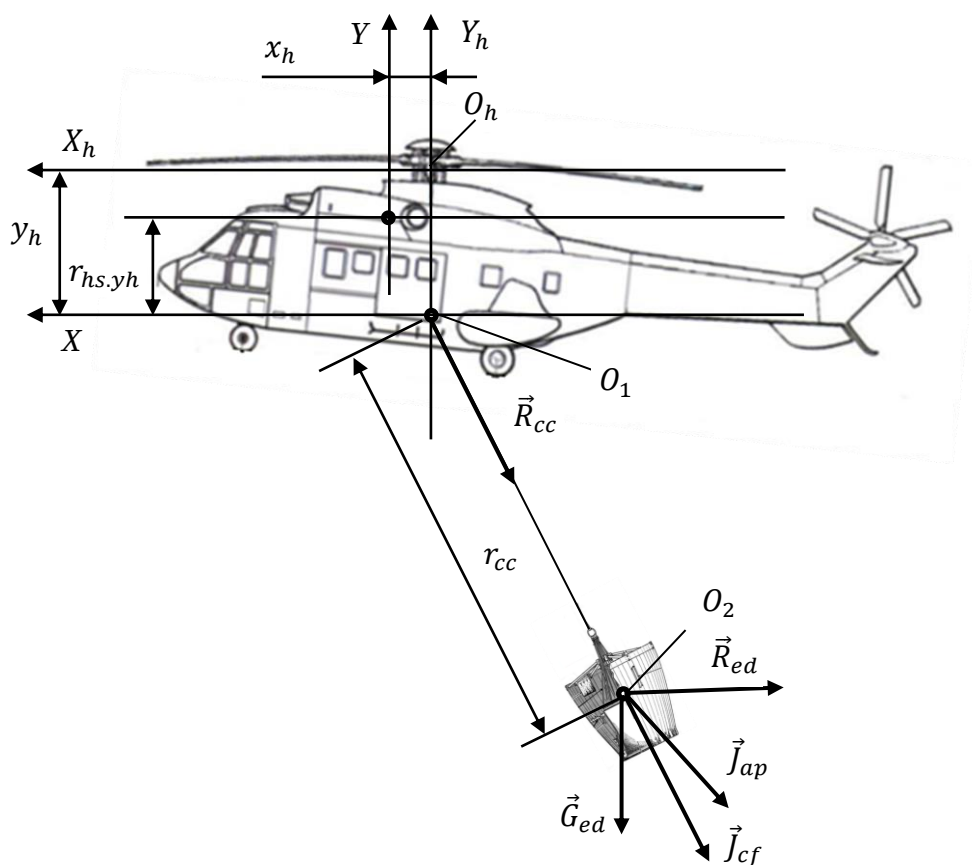
В полет на хеликоптера върху външното устройство действат различни сили- сила на тежестта, аеродинамична сила, инерционна сила, което предизвиква сила на опън $\vec{R}_{cc}$ в кабела за закачване на външното устройство. И тъй като в общия случай точката на закачване на кабела към хеликоптера не съвпада с центъра на масите на хеликоптера, то силата на опън $\vec{R}_{cc}$ в кабела ще създава момент $\vec{M}_{cc}$ спрямо центъра на масите на хеликоптера (т. O на фиг. 3).

В тази връзка уравнението на силите и на моментите, които действат на хеликоптера в полет [7], трябва да бъдат допълнени, съответно, със силата на опън в кабела $\vec{R}_{cc}$ и с момента от нея $\vec{M}_{cc}$:

$$(4) \quad \vec{F} = \vec{R}_{MP} + \vec{T}_{TP} + \vec{R}_A + \vec{G} + \vec{R}_{cc},$$

$$(5) \quad \vec{M} = \vec{M}_{MP} + \vec{M}_{TP} + \vec{M}_A + \vec{M}_{cc}.$$

За да бъде определена стойността на силата на опън в централния кабел $\vec{R}_{cc}$ е необходимо да се определи проекцията на равнодействащата сила $\vec{R}_{ed}$ на всички сили, които действат на външното устройство по оста на кабела.



Фиг. 3. Схема за определяне на силата в централния кабел на външното пожарогасително устройство и на момента от нея

Равнодействащата сила $\vec{R}_{ed}$ представлява следната векторна сума:

$$(6) \quad \vec{R}_{ed} = \vec{G}_{ed} + \vec{R}_{A.ed} + \vec{J}_{ap} + \vec{J}_{cf},$$

където: $\vec{G}_{ed}$ е силата на тежестта на външното устройство;

$\vec{R}_{A.ed}$ е равнодействащата на всички аеродинамични сили, действащи на външното устройство;

$\vec{J}_{ap}$ е инерционната сила, възникваща при ускореното движение на точката за закрепване на външното устройство към хеликоптера;

$\vec{J}_{cf}$ е инерционната центробежна сила, възникваща от залявяването на външното устройство.

Тъй като свързаната координатна система на централния кабел и на външното устройство (съответно, $O_1X_1Y_1Z_1$ и $O_2X_2Y_2Z_2$) имат твърда връзка помежду си, то е по-удобно при описание на динамика на поведение на системата „Централен кабел–външно устройство“ за свързана координатна система да бъде избрана координатната система $O_1X_1Y_1Z_1$. В този случай, движението на външното устройство на кабела спрямо стартовата координатна система може да се представи като сложно движение, което се състои от движение на свързаната координатна система $O_1X_1Y_1Z_1$ спрямо нормалната координатна система $O_{st}X_{st}Y_{st}Z_{st}$, която на свой ред се движи спрямо стартовата координатна система $O_{st}X_{st}Y_{st}Z_{st}$. В теоретичната механика е прието първият тип движение да се нарича относително, а вторият – постъпателно (преносно).

Трябва да се отбележи, че движението на системата „Централен кабел–Външно устройство“ спрямо нормалната координатна система $O_1X_{g1}Y_{g1}Z_{g1}$ (относително движение) може да се разглежда като движение на тела, които имат една условна неподвижна точка – точката на закачване (на кабела към хеликоптера). По своя характер това е въртливо движение. То е аналогично на движението на самия хеликоптер спрямо центъра на масите му и ще се поражда от въздействието на момента $\vec{M}_{ed}$, който представлява сума на моментите от силите, които действат на външното устройство, спрямо точката на закачване:

$$(7) \quad \vec{M}_{ed} = \vec{M}_{G.ed} + \vec{M}_{A.ed} + \vec{M}_{ap},$$

където: $\vec{M}_{G.ed}$ е момент от силата на тежестта на външното устройство;

$\vec{M}_{A.ed}$ е момент от аеродинамичната сила на външното устройство;

$\vec{M}_{ap}$ е момент от силите, възникващи от ускореното преместване на точката за закачване на кабела към хеликоптера.

Заклучение

Създаването на аналитични математически модели, описващи поведението в полет за гасене на пожари на хеликоптер с външно пожарогасително устройство от типа “Bambi Bucket 4453”, дава възможност за повишаване на авиационната безопасност при изпълнение на този тип изключително рискова дейност, не само при изпълнението на типов полет, но и при изследване на влиянието на случайни въздействия на пориви на вятъра в полет.

Литература:

1. Добронравов, В. В., Н. Н. Никитин, А. Л. Дворников, Курс теоретической механики: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. М. Высшая школа. 1974. 528 стр.
2. Stuckey, R.A., Mathematical Modelling of Helicopter Slung-Load Systems, Air Operations Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory, DSTOTR1257, 2002
3. Bisgaard, M., Bendtsen, J.D., La Cour-Harbo, A., Modelling of Generic Slung Load System. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit 21 – 24 August 2006, Keystone, Colorado
4. Cicolani, L.S. and Kanning, G., Equations of Motion of Slung-Load Systems, Including Multilift Systems, NASA, 1992, NASA-TP-3280
5. Загорски, Н., Изследване на колебанията на физично махало с подвижна точка на окачване. XI-та международна научна конференция „Научните изследвания, технологии и иновации – основа за изграждане на нови отбранителни способности“, 2-3 юни 2022 г., гр. Пловдив, Институт по отбрана - МО, Сборник доклади, стр. I-74 - I-81. ISSN 1312-2916
6. Загорски, Н. Изследване на влиянието на параметрите на външния товар на условията за равновесието му в полет. XI-та международна научна конференция „Научните изследвания, технологии и иновации – основа за изграждане на нови отбранителни способности“, 2-3 юни 2022 г., гр. Пловдив, Институт по отбрана - МО, Сборник доклади, стр. I-82 – I-89. ISSN 1312-2916
7. Жуков, А. Я., В. И. Егоров, А. Л. Ермаков [и др.], Динамика полета транспортных летательных аппаратов, учебник для вузов, под ред. А. Я. Жукова. М. Транспорт. 1996. 326 стр.