

Исследование динамики посадки космического аппарата на малое небесное тело при разных режимах закрепления

© Чэнь Даньхэ, В.В. Корянов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены результаты исследований вариантов посадки космического посадочного аппарата с использованием прижимных двигателей и троса. Определены параметры их работы с использованием системы закрепления космического посадочного аппарата в различных условиях. Рекомендованы оптимальные условия закрепления космического посадочного аппарата на поверхности малого небесного тела.

Ключевые слова: космический посадочный аппарат, малое небесное тело, закрепление, оптимальные условия.

Введение. Авторами [1, 2] выполнен расчет динамики углового движения космического посадочного аппарата (КПА) при посадке на поверхность небесного тела с малым тяготением. Была использована разработанная методика для КПА на трех опорах с учетом влияния прижимных двигателей и натяжения троса при закреплении аппарата на поверхности малого небесного тела.

В ходе исследований стало ясно, что определение параметров динамики движения КПА при посадке на поверхность малого небесного тела с помощью систем закрепления имеет существенное значение. Так как на поверхности небесного тела сила тяготения мала, КПА с трудом совершает посадку и закрепляется на поверхности, поэтому создание оптимальных условий для его закрепления представляется важным и необходимым.

В настоящей статье рассмотрен анализ влияния различных способов закрепления КПА при посадке на поверхность небесного тела.

Космический посадочный аппарат имеет жесткий корпус и деформируемые посадочные опоры, состоящие из системы стержней, которая образует обратную подвесную треногу (рис. 1). Центральный стержень треноги снабжен амортизатором, он может деформироваться.

При разработке математической модели движения КПА использованы следующие системы координат (см. рис. 1):

*основная система координат, в которой рассчитывается движение центра масс, связанная с поверхностью небесного тела и называемая **поверхностной** ($OXYZ$);*

неподвижная система координат ($OX_n Y_n Z_n$), когда оси $X_n Y_n$ лежат в плоскости местного горизонта, ось Y_n совпадает с местной вертикалью;

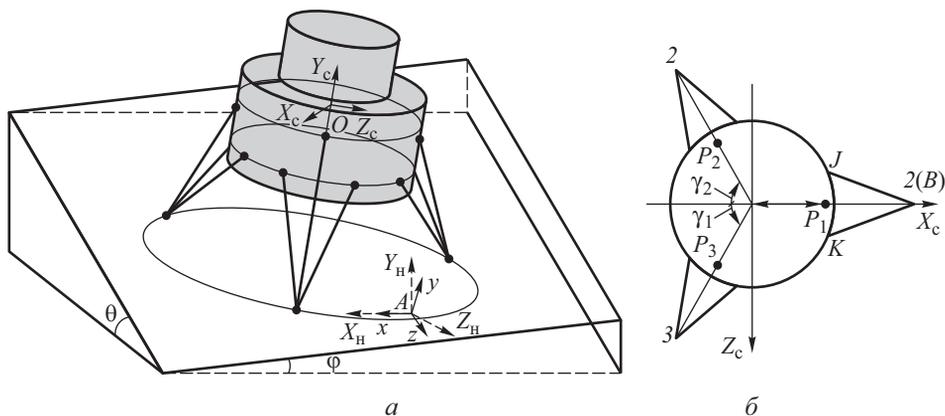


Рис. 1. Космический посадочный аппарат при посадке:
 а — КПА на площадке посадки; б — вид сверху на КПА с тремя опорами

связанная система координат $(OX_c Y_c Z_c)$, когда ось Y_c направлена вдоль продольной оси КПА, ось X_c — перпендикулярна оси Y_c и находится в плоскости XU поверхностной системы координат, ось Z_c — дополняет систему координат.

Углы θ и φ определяют переход от неподвижной системы координат в поверхностную систему координат. При этом углы наклона поверхности при посадке (θ и φ) могут изменяться в широких пределах значений.

Космический посадочный аппарат оснащен тремя прижимными двигателями, расположенными наверху симметрично под углом 120° , которые обозначены точками P_1, P_2, P_3 (рис. 1, б). Трос закреплен снизу в центре КПА. При посадке якорь-пенетратор «выстреливает» в грунт поверхности небесного тела.

Влияние на посадку различных режимов работы прижимных двигателей. Рассмотрим случаи посадки с использованием прижимных двигателей, которые установлены на КПА. Существуют разные варианты работы прижимных двигателей. Номер варианта включения двигателей прижатия обозначим NV ; тогда $NV = 1$ означает, что двигатели включаются, когда одна любая из опор коснулась поверхности; $NV = 2$ — любые две опоры коснулись поверхности; $NV = 3$ — скорость КПА по оси Y положительная.

Пусть сила тяги прижимных двигателей $P = 200$ Н, а сила натяжения троса $T = 0$. Получим следующие начальные параметры движения КПА: $V_{x_0} = 0, V_{y_0} = -1,5$ м/с, $V_{z_0} = 0, \psi_0 = \gamma_0 = 0^\circ, \theta = 0^\circ, \omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$ (рис. 2–5).

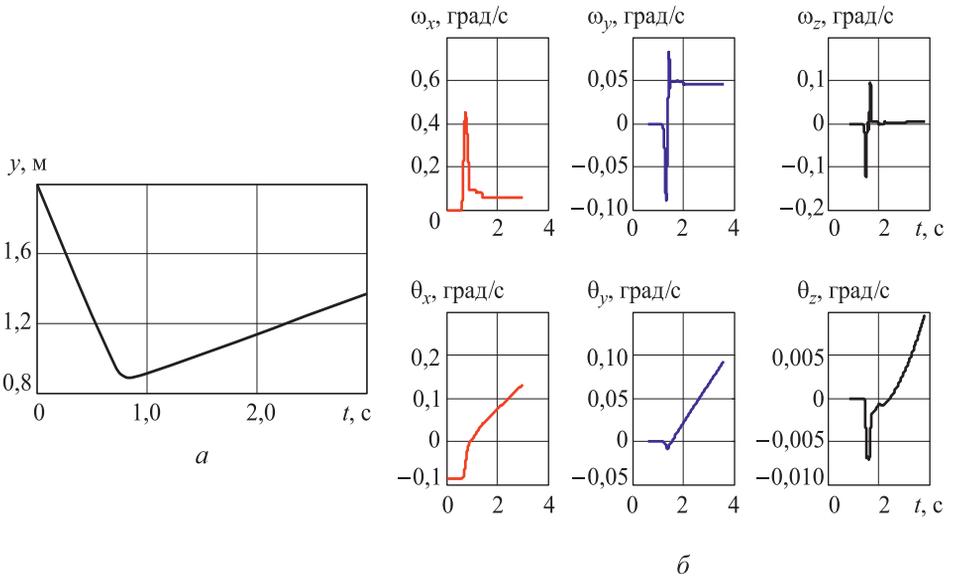


Рис. 2. Параметры работы двигателей по варианту $NV = 1$. Здесь и на рис. 3, 4: a — клиренс КПА; b — изменение угловых скоростей и углов Эйлера

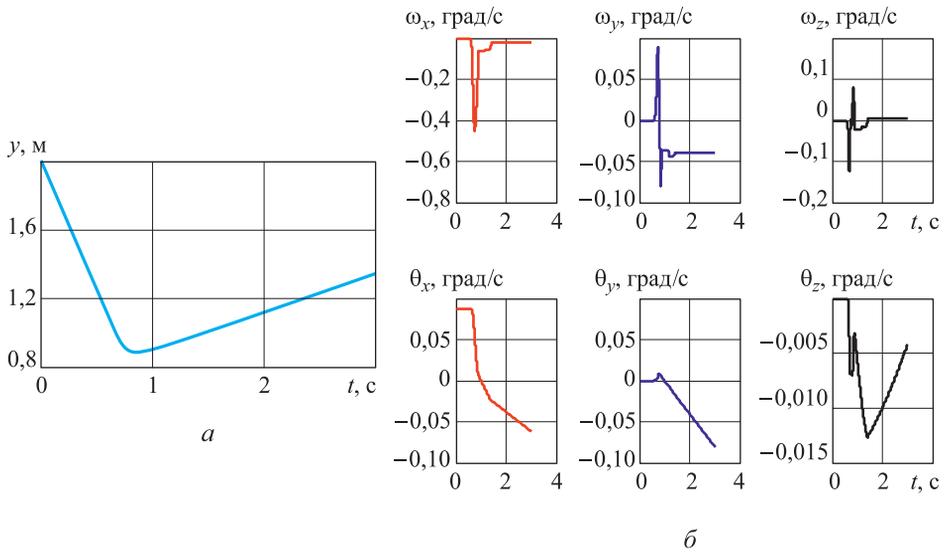


Рис. 3. Параметры работы двигателей по варианту $NV = 2$ (a, b см. на рис. 2)

Результаты расчета свидетельствуют о том, что разные режимы работы прижимных двигателей с определенной силой тяги влияют на успешность и надежность посадки. Космический посадочный аппарат «отскакивает» от поверхности небесного тела при режимах $NV = 1, NV = 2$ (см. рис. 2–4).

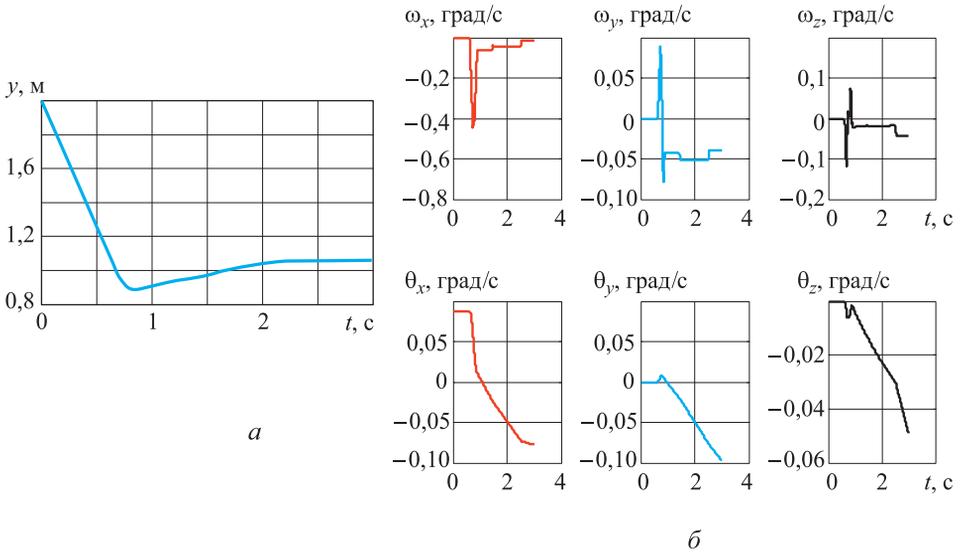


Рис. 4. Параметры работы двигателей по варианту $NV=3$ (а, б см. на рис. 2)

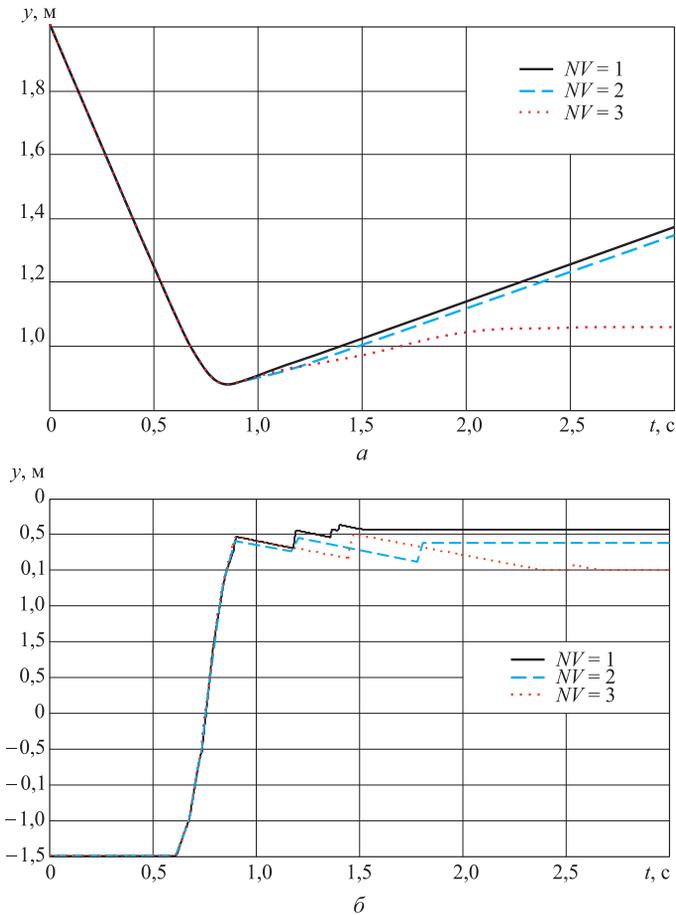


Рис. 5. Сравнительные характеристики космического посадочного аппарата по трем значениям NV :
 а — клиренс КПА; б — вертикальная скорость КПА

Вертикальная скорость КПА снижается до нуля при режиме $NV = 3$ (см. рис. 5). Из трех режимов работы прижимных двигателей наибольшую устойчивость для обеспечения успешной посадки имеют двигатели, которые включаются при положительной вертикальной скорости КПА в отличие от других вариантов.

Влияние различных режимов работы тросовой системы на посадку. Посадка КПА на поверхность малого небесного тела совершается с использованием прижимных двигателей всегда с ограничением. В случае применения якоря-пенетратора, устройство «выстреливает» в грунт поверхности небесного тела при посадке КА, вследствие чего обеспечивается постоянная сила натяжения троса, направленная вниз [4].

Значение силы натяжения троса (200 Н) задается программой расчета. Момент ее возникновения, на наш взгляд, определяется двумя возможными вариантами (рис. 6):

- сразу после «выстрела» пенетратора; при этом сила натяжения троса действует все время в ходе посадки;
- при условии увеличения длины троса, т. е. трос начинает притягивать аппарат на высоте 1 м от поверхности небесного тела еще до окончания момента посадки.

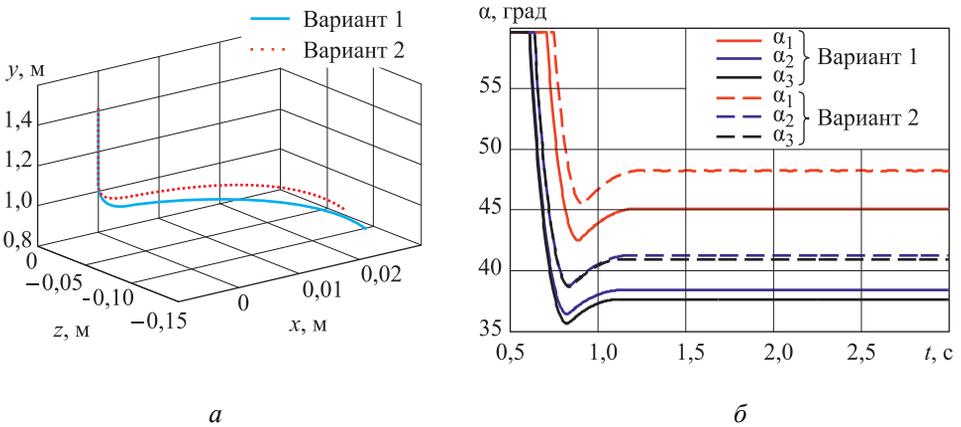


Рис. 6. Работа троса по двум вариантам ($T = 200$ Н, $P = 200$ Н):
 а — траектории посадки КПА в пространстве; б — динамика положения подкосов КПА относительно поверхности небесного тела; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — углы между опорами и поверхностью

В обоих случаях посадки выбираем режим работы прижимных двигателей $NV = 3$. Начальная ориентация КПА $\vartheta_0 = 5^\circ$.

При посадке КПА в условиях первого варианта (рис. 6, а) отмечается большее смещение по оси X и клиренс. Углы подкосов от поверхности небесного тела после посадки больше (рис. 6, б), чем после посадки в условиях второго варианта. Окончательные углы подкосов

составляют $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 38,4^\circ$ и $\alpha_3 = 37,6^\circ$ при первом варианте, т. е. сила натяжения действует на протяжении всего времени при посадке. Таким образом, тросовая система при таком режиме может обеспечить более устойчивую посадку.

Проанализируем влияние силы натяжения троса на посадку. Рассмотрим случаи посадки с постоянной силой натяжения троса $T = 200$ Н, 300 и 400 Н и при его действии на протяжении всего времени посадки (рис. 7). Начальные условия для посадки: $\vartheta_0 = 5^\circ$, $\mu = 0,1$, $V_{x0} = 0$ м/с, $V_{y0} = -1,5$ м/с, $V_{z0} = 0$.

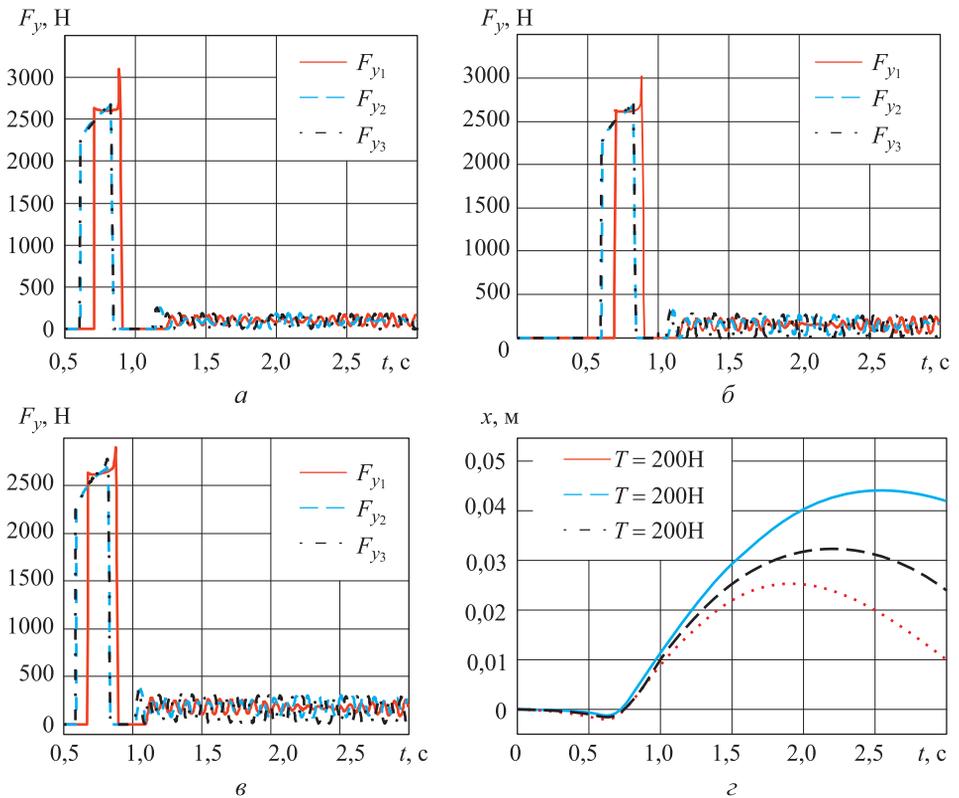


Рис. 7. Работа троса при посадке ($P = 200$ Н):

a — $T = 200$ Н, $б$ — $T = 300$ Н, $в$ — $T = 400$ Н; $г$ — смещение КПА по оси X ;

F_{y1}, F_{y2}, F_{y3} — вертикальные силы реакции от поверхности, действующие на три опоры

На рис. 7 показаны результаты моделирования вертикальных сил реакции, действующих на опоры КПА при посадке, и смещение по оси X . Максимальная сила реакции от поверхности на опоры снижается при увеличении значения силы натяжения троса, и горизонтальное смещение уменьшается.

Заключение. Итак, можно сделать вывод о том, что значение силы натяжения троса влияет на надежность посадки. Рассмотренные

случаи и полученные результаты показывают, что комплексирование системы (прижимные двигатели и система тросов) закрепления КПА обеспечивает успешную посадку на поверхность малого небесного тела. Выбор рационального комплекса системы закрепления оказывается важным фактором для достижения успешной посадки в целом.

Таким образом, рекомендуемыми оптимальными условиями для посадки КПА на поверхности малого небесного тела являются следующие начальные заданные параметры: действие системы троса на протяжении всего времени посадки с силой натяжения $T = 400$ Н, начало работы прижимных двигателей при положительном значении скорости по оси Y .

Настоящая работа имеет большое значение для поиска оптимальных условий посадки КПА и выполнения его дальнейшей задачи. Успешная посадка КПА позволит не только исследовать динамику полета КПА, но и в целом будет способствовать развитию космических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Казаковцев В.П., Корянов В.В., Чэнь Даньхэ. Исследование динамики углового движения КА при его посадке на небесное тело с малым полем тяготения. *Полет*, 2014, № 10, с. 47–53.
- [2] Казаковцев В.П., Чэнь Даньхэ, Корянов В.В. Методика определения параметров продольного движения космического аппарата при посадке на поверхность малого небесного тела. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 1 (94), с. 26–35.
- [3] Казаковцев В.П., Корянов В.В. Методика расчета параметров динамики движения космического спускаемого аппарата при жесткой посадке на поверхность планеты. *XLIII научные чтения памяти К.Э. Циолковского; тезисы докладов*. Калуга, 2008, с. 121–122.
- [4] Zhijun Zhao. *Research on the asteroid landing mechanism and its penetrating and anchoring*. Dissertation for the Doctoral Degree in Engineering, 2014, Harbin Institute of Technology, pp. 24–25.
- [5] Ковтуненко В.М. *Проектирование спускаемых автоматических космических аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1985, 263 с.
- [6] Lavender R.E. Touchdown Dynamics Analysis of Spacecraft for Soft Lunar Landing. *NASA Technical Note D-2001*, January 1964, pp. 8–32.
- [7] Hilchenbach M., Kuèchemann O., Rosenbauer H. Impact on a comet: Rosetta Lander simulations. *Planetary and Space Science*, 2000, 48, pp. 361–369.

Статья поступила в редакцию 21.02.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Чэнь Даньхэ, Корянов В.В. Исследование динамики посадки космического аппарата на малое небесное тело при разных режимах закрепления. *Инженерный журнал: науки и инновации*, 2016, вып. 6.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-06-1501>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.

Чэнь Даньхэ — аспирантка кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: баллистика и динамика движения космических аппаратов.
e-mail: cranefeeling@hotmail.com

Корянов Всеволод Владимирович — канд. техн. наук., доцент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области моделирования баллистики и динамики движения космических и спускаемых аппаратов. e-mail: vkoryanov@bmstu.ru

The study of the dynamics of the spacecraft landing on a small celestial body at different modes of fixing

© Danhe Chen, V.V. Koryanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article presents the results of research of space lander landing variants using clamping motor and cable. We determine parameters of their work using the fixing system of space lander under different conditions. On the basis of the results of research we offer recommendations on the optimal fixing conditions of space lander on the surface of a small celestial body.

Key words: space lander, small celestial body, fixing, optimal conditions.

REFERENCES

- [1] Kazakovtsev V.P., Koryanov V.V., Chen Danhe. *Polet — Flyght*, 2014, no. 10, pp. 47–53.
- [2] Kazakovtsev V.P., Chen Danhe, Koryanov V.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Series: Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2014, no. 1 (94), pp. 26–35.
- [3] Kazakovtsev V.P., Koryanov V.V. Metodika rascheta parametrov dinamiki dvizheniya kosmicheskogo spuskayemogo apparata pri zhestkoy posadke na poverkhnost' planet [Design procedure of the parameters of space lander motion dynamics at a hard landing on the planet's surface.]. *XLIII nauchnyye chteniya pamyati K.E. Tsiolkovskogo. Tezisy dokladov* [XLIII Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky. Abstracts]. Kaluga, 2008, pp. 121–122.
- [4] Zhijun Zhao. *Research on the asteroid landing mechanism and its penetrating and anchoring*. Dissertation for the Doctoral Degree in Engineering, 2014, Harbin Institute of Technology, pp. 24–25.
- [5] Kovtunenkov V.M. *Proyektirovaniye spuskayemykh avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov* [Design of launchable unmanned spacecraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 263 p.
- [6] Lavender R.E. Touchdown Dynamics Analysis of Spacecraft for Soft Lunar Landing. *NASA Technical Note D-2001*, January 1964, pp. 8–32.
- [7] Hilchenbach M., Kuèchemann O., Rosenbauer H. Impact on a comet: Rosetta Lander simulations. *Planetary and Space Science*, 2000, 48, pp. 361–369.

Chen Danhe, a postgraduate student of the Department of Dynamics and Control of Rocket and Spacecraft Flight at Bauman Moscow State Technical University. Field of research interests includes ballistics modelling and dynamics of spacecraft and descent vehicle motion. e-mail: crane feeling@hotmail.com

Koryanov V.V. (b. 1982) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2006. Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of the Department of Dynamics and Control of Rocket and Spacecraft Flight at Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 works in the field of ballistics modelling and dynamics of spacecraft and descent vehicle motion. e-mail: vkoryanov@bmtu.ru