

УДК 531.36

## **Математическое моделирование спуска оперенного тела с разным числом лопастей\***

Окунев Ю.М.<sup>1</sup>, Привалова О.Г.<sup>1</sup>, Самсонов В.А.<sup>1</sup>

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова<sup>1</sup>

Строится математическая модель движения тяжелого оперенного тела на спуске в невозмущенной атмосфере. Оперение тела состоит из одинаковых лопастей. Тело может иметь разное количество лопастей, при этом считается, что обтекание каждой лопасти потоком воздуха не подвергается влиянию соседних лопастей. Лопастей на теле размещаются таким образом, чтобы центры лопастей оказались в плоскости, ортогональной оси тела, на одинаковом расстоянии от нее. Углы между державками, на которых установлены лопасти, одинаковы. Лопастей представляют собой тонкие пластины в форме шайбы или прямоугольника, аэродинамические характеристики которых известны [1]. Проводится численное моделирование режимов спуска тела с разным числом лопастей и разными углами их установки. Случай единственной лопасти рассмотрен в [2].

В работе [3] исследовался спуск осесимметричного оперенного тела с четырьмя лопастями, у которого лопасти были установлены на один и тот же угол, относительно плоскости, содержащей центры лопастей. В работе [4] получены траектории движения центра масс асимметричного тела с четырьмя лопастями.

В настоящей работе исследуется движение оперенного тела с тремя и четырьмя лопастями. Изучается, каким образом изменится движение тела, когда нарушается его симметрия, вследствие того, что одна или две лопасти повернуты на углы разной величины.

В работах [5] было показано, что на спуске осесимметричного тела для некоторых значений его физических и геометрических параметров возникает семейство устойчивых тривиальных режимов авторотации. Установлено, что при тех же параметрах задачи при движении асимметричного тела с тремя и четырьмя лопастями возникает притягивающий нетривиальный режим регулярной прецессии вокруг оси динамической симметрии.

Ранее было получено [3], что если режим авторотации неустойчив при одинаковых значениях установочных углов лопастей, то возникает режим регулярной прецессии, осью которой является вертикаль. Показано, что при изменении значений одного установочного угла лопасти у тела с тремя лопастями, и одного или двух установочных углов лопастей у тела с четырьмя лопастями, при котором теряется симметрия установки оперения, движение центра масс тела на спуске происходит по винтовой линии, у которой имеется «вторичный» винт с вертикальной осью.

Установлено, что при определенном расположении лопастей на теле возможны режимы планирования.

В случае, когда плоскости лопастей лежат в плоскости  $S$ , перпендикулярной оси симметрии тела, содержащей центр масс и центры лопастей, существует семейство неизолированных установившихся режимов планирования [3]. Плоскость  $S$  может быть наклонена под различными углами к горизонту. На этих режимах тело движется поступательно с постоянной скоростью, углы атаки на лопастях одинаковы.

Определено, что изолированные режимы планирования возникают у тела с четырьмя одинаковыми лопастями, если установить две соседние лопасти на одинаковые углы, а две

---

\*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (Проект № 17-08-01366) и (Проект № 18-01-00538)

другие на углы той же величины, но противоположного знака. Угол планирования определяется установочным углом лопасти, плоскость центров лопастей на этом режиме горизонтальна. Планирование происходит в биссекториальных плоскостях, проходящих между осями положительно и отрицательно установленных лопастей.

Установлено, что изолированные режимы планирования возникают и у тела с тремя одинаковыми лопастями, если установить одну лопасть на некоторый угол, другую – на угол той же величины, но противоположного знака, а третью лопасть расположить под нулевым углом. Планирование происходит в плоскостях, проходящих вдоль оси лопасти, установленной под нулевым углом. Угол планирования определяется установочным углом лопасти, плоскость центров лопастей на этом режиме горизонтальна.

Показано, что у тела с четырьмя лопастями, лопасти которого установлены на углы одинаковой величины, но с поочередной сменой знака, возможен режим устойчивого установившегося вертикального спуска с постоянной скоростью. При тех значениях параметров задачи, при которых вертикальный спуск неустойчив, возникает хаотическое движение центра масс тела [6]. Найдены такие значения параметров задачи, при которых центр масс тела с тремя лопастями тоже совершает хаотическое движение.

## Литература

1. Табачников В. Г. Стандартные характеристики крыльев на малых скоростях во всем диапазоне углов атаки // Тр. ЦАГИ. 1974. Вып. 1621. С. 79-93.
2. Овчинников М. Ю. Стационарные движения твердого тела с жесткой лопастью в однородной атмосфере // Изв. РАН. МТТ. 2003. №5. С. 3-23.
3. Окунев Ю. М., Привалова О. Г., Самсонов В. А. О влиянии оперения на характер спуска тяжелого тела // Сб. пленарных и избранных докладов «Восьмого Международного Аэрокосмического Конгресса». Москва: "Перо 2015. С. 120-126.
4. Okunev Yu. M., Privalova O. G., Samsonov V. A. A descent mode of the finned body with asymmetrical pitch angles of blades // Proceedings of 2018 14th International Conference Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference), STAB 2018, IEEE (Piscataway, NJ, United States). С. 1-2.
5. Привалова О. Г., Окунев Ю. М., Самсонов В. А. Устойчивость движения оперенного тела, авторотирующего в среде // ТРУДЫ МФТИ. 2017. Т. 81, № 6. С. 51-56.
6. Окунев Ю. М., Привалова О. Г., Самсонов В. А. О движении асимметричного оперенного тела // Сб. материалов VI Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные основы баллистического проектирования». СПб: Изд-во БГТУ, 2018. С. 34-35.

MSC2010 70

## Mathematical modeling of the descent of a finned body with different number of blades

Yu.M. Okunev<sup>1</sup>, O.G. Privalova<sup>1</sup>, V.A. Samsonov<sup>1</sup>

Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University<sup>1</sup>