

Уточненная оценка аэродинамических характеристик наноспутника сложной геометрии

© Е.В. Барина, Е.А. Болтов, Н.А. Елисов, И.А. Ломака

Самарский национальный исследовательский университет имени академика
С.П. Королёва, Самара, 443086, Россия

В работе показан подход к уточнению аэродинамических характеристик (коэффициента лобового сопротивления, аэродинамического момента) наноспутника сложной геометрии. Подход, основанный на методе прямого моделирования Монте-Карло, учитывает такие факторы, как диффузное отражение частиц от поверхности наноспутника (модель Черчиньяни — Лампис — Лорда), химический состав атмосферы на высоте орбиты и тепловую скорость частиц. Для описания геометрии наноспутника используется конечно-элементная сетка размерностью 5 мм. В работе приведено сравнение предлагаемого подхода с инженерным методом расчета аэродинамических характеристик на примере наноспутника SamSat-ION в случае его плоского движения. Для коэффициента лобового сопротивления и величины аэродинамического момента различие результатов при использовании рассмотренных подходов достигает 20 % и 16 % соответственно.

Ключевые слова: наноспутник, свободно-молекулярное течение, прямое моделирование Монте-Карло, взаимодействие частиц с поверхностью, модель Черчиньяни — Лампис — Лорда, коэффициент лобового сопротивления, центр давления

Введение. В настоящее время наноспутники (НС) являются наиболее активно развивающимся классом космических аппаратов (КА), которые решают все более и более сложные научные и технические задачи (дистанционное зондирование Земли, мониторинг околоземного пространства, астрономические исследования, исследование ионосферы и др.) [1–3].

Как правило, НС представляют собой КА формата CubeSat, которые имеют форму прямоугольного параллелепипеда сечением 100×100 мм и длиной от 113 до 340 мм (1U–3U соответственно). Также находят применение НС формата 6U и 12U (габаритами 100×200×340 и 200×200×340 мм соответственно). Формат CubeSat накладывает существенные ограничения на массу, габариты и энергетику полезной нагрузки НС, в связи с чем разработчикам приходится использовать различные трансформируемые конструкции на борту НС (солнечные панели, штанги с аппаратурой, антенны и др. [4–6]).

В основном НС запускаются на низкие околоземные орбиты высотой от 300 до 600 км, на которых аэродинамические силы и моменты оказывают существенное влияние на динамику центра масс НС и относительно центра масс. Это вызвано тем, что величина углового ускорения наноспутника, обусловленного аэродинамическим момен-

том, на два порядка выше, чем у классических аппаратов с большими массой и размерами [7, 8].

Для расчета аэродинамических сил, действующих на НС, необходимо использовать уравнение Больцмана, которое описывает движение разреженного газа [9]. Прямое моделирование этого уравнения весьма затруднено вследствие необходимости решения интегрально-дифференциальных уравнений, что приводит к большим вычислительным затратам. В связи с этим было разработано несколько подходов к расчету аэродинамических характеристик (АДХ), которые можно подразделять на инженерные и численные.

Среди инженерных подходов наиболее популярными являются основанные на теории локального взаимодействия, которая заключается в том, что поток импульса, воздействующего на элемент поверхности, определяется местным углом его наклона к набегающему потоку и не зависит от формы тела [10]. Такой подход к определению АДХ КА не учитывает тепловую скорость частиц, химический состав атмосферы, направление векторов нормалей и касательных геометрии КА и характер взаимодействия частиц с поверхностью КА.

Для учета указанных особенностей Берд [11] в 1963 г. предложил статистический подход к решению уравнения Больцмана — прямое моделирование Монте-Карло (ПММК). Эффективность предложенного подхода была подтверждена сравнением результатов моделирования, проведенных для орбитального корабля Space Shuttle, и полученных летных данных [12], и потому этот подход получил широкое распространение среди исследователей.

Одной из первых и простых моделей взаимодействия частиц с поверхностью была зеркально-диффузная модель Максвелла [13], в соответствии с которой частицы с заданной вероятностью (коэффициентом диффузности) отражаются либо зеркально, либо диффузно. Преимуществом этой модели является ее относительная простота, а недостатком — то, что она не учитывает материал поверхности, химический состав частицы и потерю кинетической энергии частицы после соударения с поверхностью.

Модель Ночиллы [14], предложенная в 1962 г., была лишена упомянутых недостатков. Она предполагает использование коэффициента термической аккомодации, который характеризует потерю кинетической энергии частицы после соударения, и осреднение параметров набегающего потока. В соответствии с данной моделью аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы являются функциями от скорости отражения, угла рассеивания и коэффициента термической аккомодации. Модель Ночиллы не получила широкого распространения, так как область ее применения была ограничена. Модель хорошо описывала взаимодействие

лишь некоторых газов (He, Ar, N₂) с полированными поверхностями. Несмотря на это, модель Ночиллы дала толчок к активному изучению вопроса взаимодействия частиц с поверхностью.

В 1971 г. Черчиньянни и Лампис пересмотрели модель Ночиллы в рамках теории ядра рассеивания и представили собственную модель CL [15]. Она предполагала отсутствие адсорбции (поглощения частиц газа твердой поверхностью) и учет взаимодействия каждой частицы набегающего потока с поверхностью тела. Это позволило существенно повысить точность аэродинамических расчетов. В 1991 г. Лордом было предложено уточнение модели Черчиньянни — Ламписа путем расчета ядра рассеивания отдельно для нормальной и касательной составляющих [16]. Позже, в 1995 г., им было представлено дальнейшее развитие модели CL, которое позволило моделировать диффузное отражение частиц от поверхности при неполной аккомодации [17] и интегрировать его в алгоритм ПММК [18]. Данное расширение модели CL привело к его широкому распространению среди исследователей, и модель CL впоследствии была переименована в модель Черчиньянни — Ламписа — Лорда (CLL).

Эффективность предложенных подходов (ПММК и модели CLL) подтверждается многими научными исследованиями. Например, в работах [19, 20] было выполнено сравнение результатов моделирования с использованием моделей Максвелла и CLL и полученных в ходе эксперимента, которое показало хорошую согласованность. Кроме того, авторами было отмечено, что модель CLL более адекватно описывает взаимодействие частиц с поверхностью, чем модель Максвелла. На основе CLL в работе [21] были получены аналитические модели коэффициентов лобового сопротивления для тел простой формы, учитывающие особенности свободно-молекулярного течения. Используя ПММК, в [22] был определен коэффициент лобового сопротивления космического аппарата GRACE с учетом низкой солнечной активности.

Кроме того, на основе модели CLL предлагаются новые модели взаимодействия частиц с поверхностью. Например, в работе [23] представлена модель, отличающаяся от CLL тем, что она позволяет учесть при моделировании химически реагирующий разреженный газ.

В настоящее время в Самарском университете разрабатывается НС SamSat-ION, предназначенный для исследования ионосферы Земли. В состав его научной аппаратуры входят датчик параметров плазмы и выносной магнитометр на штанге. Чувствительные элементы научной аппаратуры НС расположены на внешних сторонах НС. После отделения от носителя данные элементы раскрываются и занимают рабочее положение, показанное на рис. 1.