

УДК 629.78

МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОННОГО ПУЧКА НА КРУПНЫЙ ОБЪЕКТ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ТЕХНОГЕННОЙ ПРИРОДЫ© 2019 г. А. Б. Надирадзе¹, *, Р. Р. Рахматуллин¹, **, В. А. Обухов², В. В. Свотина²¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)”, Москва, Россия²Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики МАИ, Москва, Россия

*e-mail: nadiradze@mai.ru

**e-mail: riame@sokol.ru

Поступила в редакцию 08.04.2019 г.

После доработки 19.04.2019 г.

Принята к публикации 24.04.2019 г.

Метод увода крупногабаритных объектов космического мусора (ОКМ) воздействием на него ионным пучком (IonShepherd) может быть чрезвычайно эффективным, особенно применительно к удалению ОКМ из области геостационарной орбиты (ГСО). Однако данный метод сопряжен с рядом серьезных проблем, обусловленных эффектами взаимодействия ионного пучка с поверхностью ОКМ. В данной работе проведено моделирование механического воздействия на ОКМ слабо расходящегося ионного пучка ксенона с током 0.5 А и энергией 4 кэВ. В качестве ОКМ техногенной природы рассмотрен разгонный блок “Бриз-М”. Исследовано влияние точности прицеливания ионного пучка и коэффициентов аккомодации материалов внешней поверхности ОКМ на величины возмущающих усилий и моментов, действующих на ОКМ. Показано, что даже небольшие отличия коэффициентов аккомодации реального материала от идеального, при котором взаимодействие происходит в режиме полного поглощения импульса, приводят к возникновению боковой силы, способной за время увода сместить ОКМ на сотни километров от его начального положения. Погрешность в прицеливании ионного пучка приводит к возникновению значительных крутящих моментов, способных привести к вращению ОКМ с угловой скоростью до 1–2 оборотов в секунду.

Ключевые слова: космический мусор, космический аппарат, ионный пучок, коэффициенты аккомодации, механическое воздействие

DOI: 10.1134/S0002331019030129

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время предлагаются различные технические устройства, которые должны обеспечить увод элементов космического мусора на безопасные орбиты. Среди них для решения задачи увода из окрестности ГСО ОКМ предлагается использовать сервисные космические аппараты (СКА) с электроракетными двигательными установками (ЭРДУ) [1]. При этом одним из эффективных методов воздействия на ОКМ рассматривается метод бесконтактного воздействия, основанный на передаче импульса уводимому ОКМ ионным пучком, инжектируемым с борта СКА (“Ion Beam Shepherd” [2]). Требуемая характеристическая скорость для перелета из окрестности

ГСО на орбиту захоронения около 11 м/с. Оценкой легко получить, что, производя воздействие на достаточно крупный ОКМ (массой порядка единиц тонн) силой в пределах десятков мН, можно осуществить увод ОКМ из области ГСО на безопасную орбиту (выше ГСО на 300 км) за время в пределах десятков суток. Эти обстоятельства позволяют рассматривать данный метод удаления ОКМ как весьма перспективный. Практическая реализация метода Ion Beam Shepherd применительно к области ГСО позволит оценить перспективы его использования для защиты от астероидов, представляющих угрозу Земле [3].

В данной статье исследуется влияние точности прицеливания ионного пучка на центр масс (ЦМ) ОКМ и коэффициентов аккомодации материалов внешней поверхности ОКМ на величины возмущающих усилий и моментов, действующих на ОКМ.

Проблема прицеливания ионного пучка состоит в том, что, если результирующая сила, действующая на ОКМ, проходит не строго через ЦМ ОКМ, а с некоторым смещением, возникает крутящий момент, способный привести к закручиванию ОКМ. За время увода, которое по оценкам составляет 5–15 сут, скорость вращения может достигать 1–2 оборотов в секунду, что отрицательно скажется на управляемости связки ОКМ и СКА. Очевидно, что реализовать точное прицеливание в принципе невозможно, поскольку положение ЦМ ОКМ априори неизвестно. Кроме того, ОКМ и СКА находятся в постоянном движении друг относительно друга, что также приводит к неизбежным ошибкам прицеливания. Поэтому при проработке системы управления связкой необходимо иметь информацию о возможных величинах крутящих моментов, обусловленных ошибками прицеливания.

Вопрос о влиянии коэффициентов аккомодации на величины возмущающих усилий и моментов, действующих на ОКМ, возникает в связи с тем, что при расчетах механического воздействия ионного пучка на ОКМ используются значения коэффициентов аккомодации, соответствующие режиму полного поглощения импульса (ППИ). Это допущение обосновывается тем, что при высоких энергиях ионов в пучке режим взаимодействия ионов с большинством материалов асимптотически стремится к режиму ППИ. Однако при этом сила, действующая на ОКМ, строго соответствует вектору осевого импульса пучка. Исключение составляют случаи, когда пучок не полностью покрывает ОКМ. Тогда, в силу асимметрии воздействия, может возникнуть небольшая боковая сила, смещающая ОКМ в сторону от его начального положения. Если же реализуется режим взаимодействия, отличный от ППИ, боковая сила возникает всегда, независимо от степени покрытия пучком поверхности ОКМ. И чем больше отклонение от режима ППИ, тем больше величина боковой силы. В связи с этим возникает вопрос, насколько велика боковая сила при реальных значениях коэффициентов аккомодации.

Для ответа на эти вопросы в данной статье приведены результаты расчетов воздействия ионного пучка на ОКМ, в качестве которого рассматривается разгонный блок “Бриз-М”. В расчетах использованы новые данные о коэффициентах аккомодации реальных материалов при высоких скоростях ионов, приведенные в работе [4].

МОДЕЛЬ ИОННОГО ПУЧКА

Подробное описание газоразрядного источника ионов (далее ионной пушкой – ИП) с электростатической системой ускорения ионов (далее ионно-оптической системой – ИОС) и формируемого им ионного пучка было приведено в работе [5].

Ионный пучок имеет клиновидную форму с полууглами продольной и поперечной расходимости $\beta_{//} = 0.3^\circ$ и $\beta_{\perp} = 3^\circ$, соответственно. На расстоянии 30 м от источника размеры сторон сечения пучка составляют: $l_x = 0.47$ м; $l_y = 3.3$ м. Энергия ионов – $E_0 = 4$ кэВ, скорость ионов (ксенон) $v_0 = 76$ км/с, а тяга источника $P = 52$ мН.

Для проведения расчетов используется модель точечного источника, согласно которой вектор скорости ионов во всех точках “пятна” направлен из центра источника.

Расчетная модель механического воздействия

В общем случае механическое взаимодействие частиц пучка с поверхностью твердого тела характеризуется коэффициентами обмена нормальным и тангенциальным импульсом, показывающими какая доля импульса первичных частиц передается поверхности [6]. При этом полный импульс, переданный ионом к поверхности, определяется соотношением (1):

$$\vec{P} = \rho V^2 (\vec{n}p_n + \vec{t}p_t),$$

где \vec{n} и \vec{t} — орты нормали и касательной к поверхности; ρ — массовая плотность набегающего потока частиц; V — скорость частиц в набегающем потоке; p_n , p_t — коэффициенты обмена нормального и касательного импульса, соответственно.

Коэффициенты обмена являются функциями угла падения и скорости частиц. Для расчета взаимодействия струи с поверхностью необходимо задать эти зависимости в виде аналитических соотношений или в табличной форме. Однако детальная информация о коэффициентах обмена имеется только для весьма ограниченного числа пар частица-поверхность, поэтому во многих случаях предпочтительнее и проще использовать разного рода модели, связывающие коэффициенты обмена с параметрами взаимодействия.

Одной из наиболее известных является модель, использующая интегральные аналоги коэффициентов обмена — т.н. коэффициенты аккомодации нормального σ_n и тангенциального σ_t импульса. Эти коэффициенты характеризуют степень передачи импульса и энергии по сравнению с равновесными условиями. Они используются при определении аэродинамических характеристик тел в свободномолекулярном режиме обтекания и являются фундаментальными элементами расчетных соотношений независимо от принятой схемы взаимодействия частиц струи с поверхностью твердого тела [6].

При больших скоростях ионов соотношения, связывающие коэффициенты аккомодации и коэффициенты обмена, принимают вид:

$$p_n = (2 - \sigma_n) \cos^2(\theta), \quad (1a)$$

$$p_t = \sigma_t \sin(\theta) \cos(\theta). \quad (1б)$$

Коэффициенты аккомодации σ_n , σ_t имеют вполне понятный физический смысл и ограниченный диапазон значений, что делает их весьма удобными для практического применения.

Легко убедиться, что при значениях коэффициентов аккомодации $\sigma_n = \sigma_t = 0$ реализуется режим зеркального отражения частиц от поверхности (модель “каучукового мячика”) при котором касательная компонента импульса равна нулю, а нормальная равна удвоенному импульсу частицы.

При $\sigma_n = \sigma_t = 1$ реализуется режим полного поглощения импульса (ППИ), что характерно для взаимодействия ионов пучка с материалами, при котором импульс частицы полностью передается поверхности (модель “пластилинового мячика”).

При других значениях коэффициентов аккомодации реализуются промежуточные режимы взаимодействия.

Коэффициенты аккомодации σ_n и σ_t зависят от сочетания физических свойств частиц и материала поверхности, морфологии поверхности, энергии и угла падения частиц, и должны быть определены расчетным путем или экспериментально.

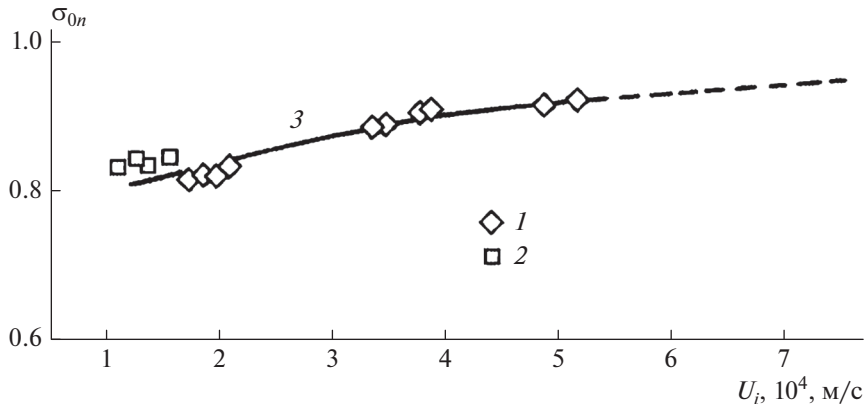


Рис. 1. Зависимость коэффициента аккомодации экранно-вакуумной изоляции (ЭВТИ) от скорости ионов ксенона [4].

Поскольку в литературе практически отсутствуют данные по коэффициентам аккомодации материалов КА при энергиях ионов пучка, в расчетах обычно принимают значения $\sigma_n = \sigma_\tau = 1$, соответствующие режиму ППИ. Основанием для этого является тот факт, что с ростом энергии значения коэффициентов аккомодации асимптотически стремятся к 1 [7]. Однако недавние данные [4] показывают, что даже при большой энергии ионов значения σ_n, σ_τ все еще не равны 1 (рис. 1).

Кроме того, значения коэффициентов аккомодации не являются константами и проявляют зависимость от угла падения ионов (рис. 2).

В связи с этим возникает вопрос о том, насколько сильно это влияет на величины сил и моментов, действующих на ОКМ со стороны ионного пучка.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов обмена, рассчитанные по формулам (1а), (1б) для режима ППИ и для экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) по данным работы [4].

Из рис. 3 видно, что коэффициенты обмена ЭВТИ отличаются от режима ППИ не более чем на 3–5%. Поэтому, на первый взгляд, отличие силового воздействия ионного пучка на ОКМ должно иметь тот же порядок. Однако в некоторых случаях отличия могут быть намного больше. Такие ситуации возникают, когда суммарное воздействие на ОКМ складывается из двух больших и соизмеримых величин, имеющих противоположные знаки.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Для оценки влияния точности прицеливания и коэффициентов аккомодации на величины сил и моментов проводились расчеты воздействия ионного пучка на разгонный блок “Бриз-М”. Схема воздействия приведена на рис. 4.

Модель ОКМ (“Бриз-М”) представляет собой цилиндр диаметром 2490 мм и длиной 2654 мм. ЦМ ОКМ находится в геометрическом центре цилиндра. Масса ОКМ составляет 1600 кг.

В расчетах варьировались следующие параметры: угол поворота ОКМ относительно оси $Y - \beta_y$ ($\beta_y = 0 - 360^\circ$), “прицельный параметр” — смещение ИП относительно ЦМ ОКМ вдоль оси $X - \delta_x$ ($\delta_x = 0; 100; 500$ мм).

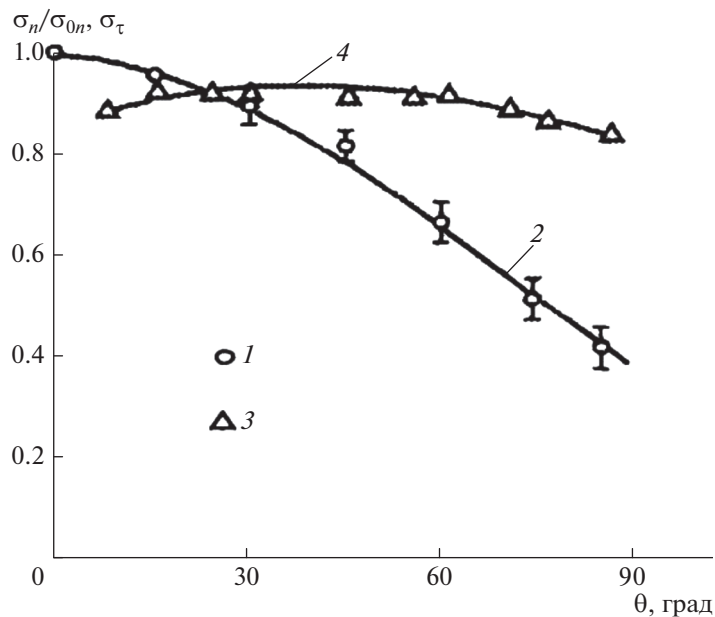


Рис. 2. Зависимость коэффициентов аккомодации ЭВТИ от угла падения ионов [4].

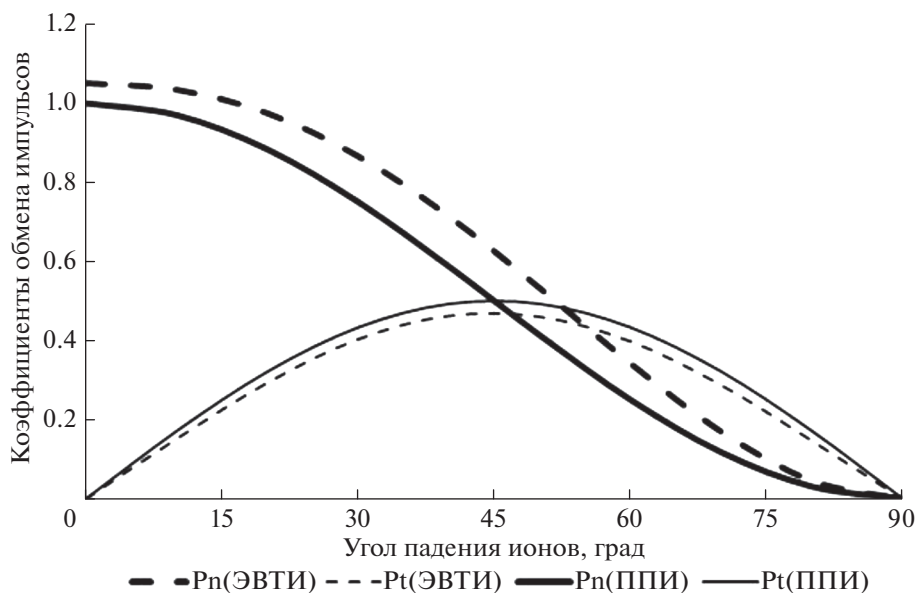


Рис. 3. Зависимость коэффициентов обмена реального (ЭВТИ) и идеального (ППИ) материалов от угла падения ионов ксенона.

Расстояние от ИП до ОКМ (30 м) выбрано так, чтобы пучок полностью покрывал ОКМ при любых его положениях. При этом коэффициент использования пучка равен 1, а моменты, возникающие при возможных значениях прицельного параметра, минимальны.

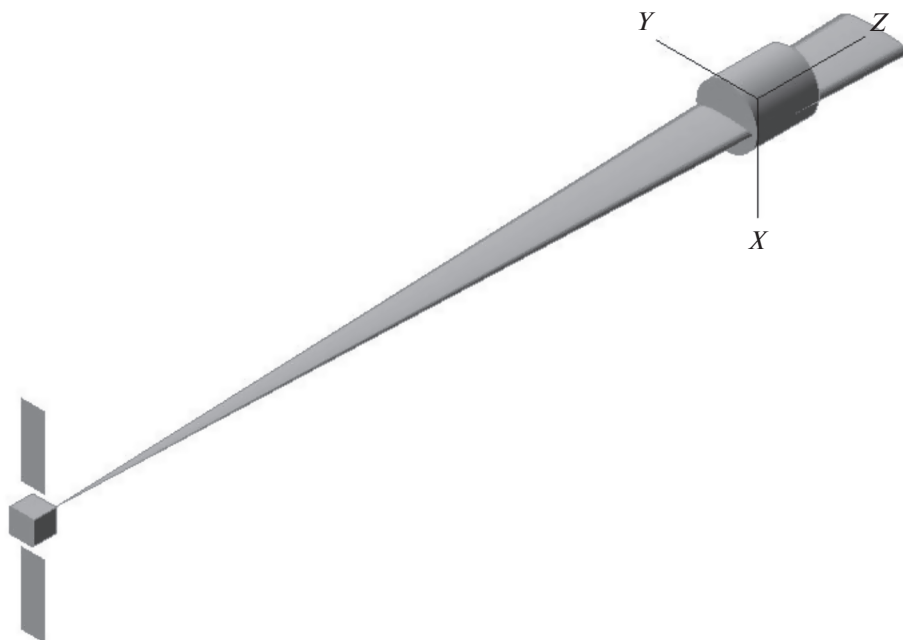


Рис. 4. Геометрическая модель воздействия ионного пучка на ОКМ.

На рис. 5 приведены результаты расчета продольной силы, действующей на ОКМ со стороны ионного пучка.

Из рис. 5 следует, что влияние коэффициентов аккомодации и прицельного параметра на величину продольной силы F_z незначительны. Средние значения F_z приведены в табл. 1.

Таким образом, если пучок полностью покрывает ОКМ (коэффициент использования пучка близок к 1), можно считать, что продольная сила $F_z \approx P$.

На рис. 6 приведены результаты расчета боковой силы, действующей на ОКМ со стороны ионного пучка.

Средние значения F_x приведены в табл. 2.

Таблица 1. Средние за оборот ОКМ значения F_z

	0 мм	100 мм	500 мм
F_z (ППИ), мН	39.9	40.0	39.3
F_z (ЭВТИ), мН	42.1	42.3	41.4

Таблица 2. Средние за оборот ОКМ значения F_x

	0 мм	100 мм	500 мм
F_x (ППИ), мН	0.00	-0.01	-0.02
F_x (ЭВТИ), мН	0.00	-0.40	-1.87

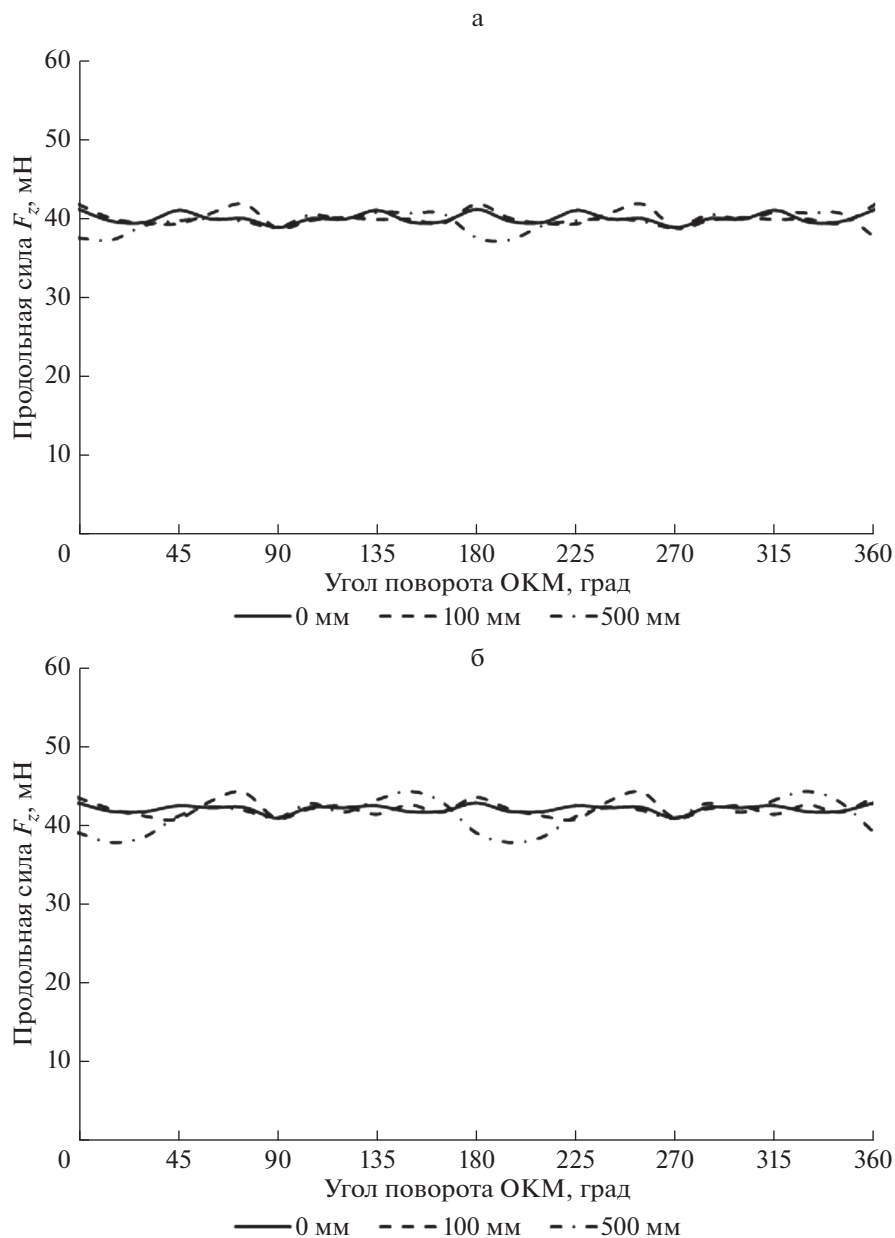


Рис. 5. Значения продольной силы F_z при различных значениях прицельного параметра δ_x для режима ППИ (а) и для ЭВТИ (б).

Проведенный анализ показал, что значения боковой силы в режиме ППИ являются результатом ошибок интегрирования, возрастающих при асимметричном воздействии пучка на ОКМ. Теоретически в режиме ППИ при полном покрытии пучка ОКМ боковой силы возникать не должно.

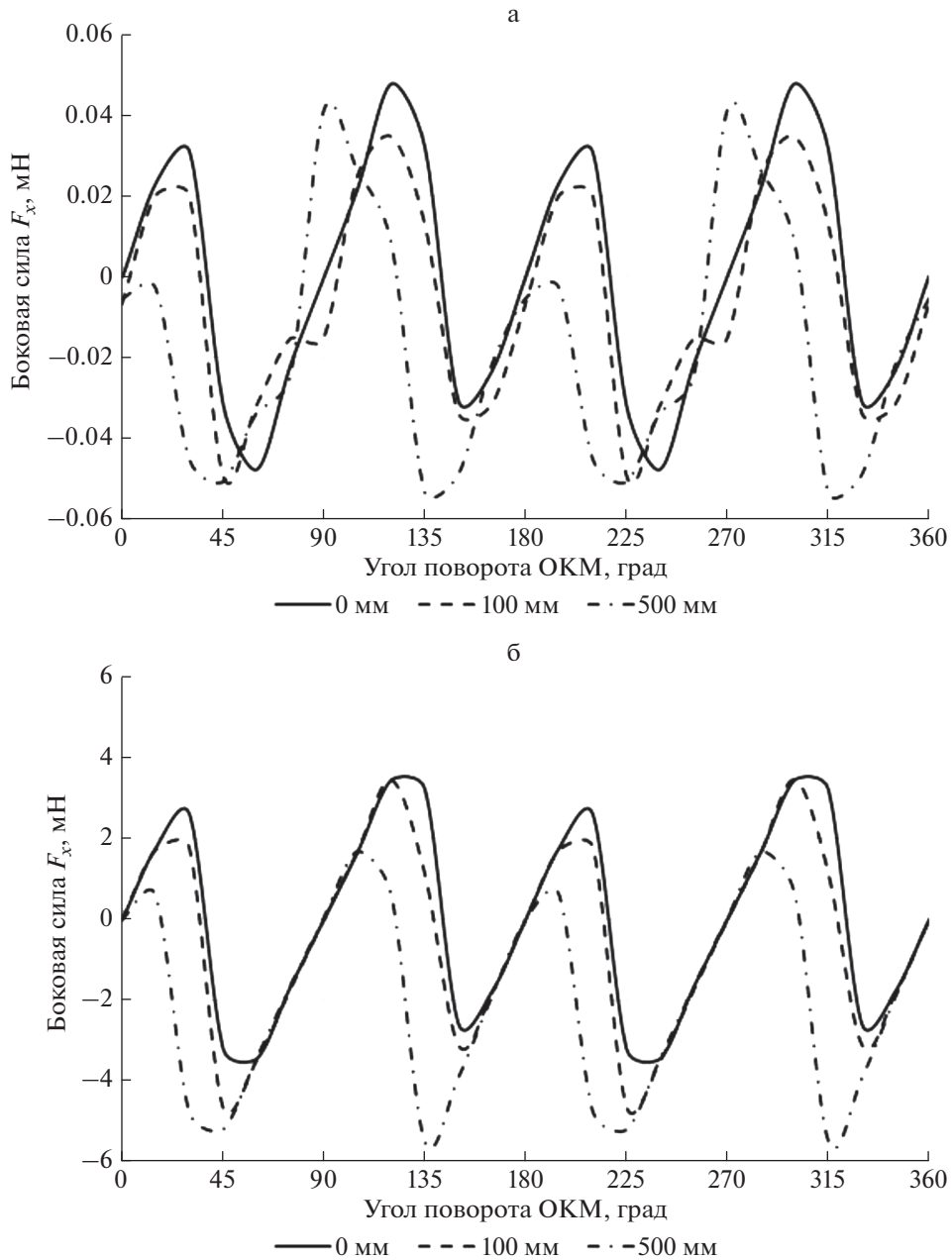


Рис. 6. Значения боковой силы F_x при различных значениях прицельного параметра δ_x для режима ППИ (а) и для ЭВТИ (б).

В режиме неполного поглощения импульса (ЭВТИ) средняя за оборот боковая сила составляет $\sim 5\%$ продольной силы (тяги ИП), что связано с отличием коэффициентов аккомодации. Амплитуда боковой силы достигает 10% тяги ИП.

Таблица 3. Средние за оборот ОКМ значения M_y

	0 мм	100 мм	500 мм
M_y (ППИ), мНм	0.0	-3.9	-19.7
M_y (ЭВТИ), мНм	0.0	-3.7	-18.7

Наличие боковой силы приводит к смещению ОКМ от его начального положения. Для оценки этого смещения определим время увода ОКМ на орбиту захоронения.

Согласно [8], требуемая характеристическая скорость для перелета из окрестности ГСО на орбиту захоронения определяется разностью высот h орбиты захоронения и ГСО. Для перелета с малой трансверсальной тягой эта характеристическая скорость определяется как разность круговых скоростей на начальной орбите (ГСО) и конечной орбите (орбите захоронения):

$$\Delta V_{\text{хар}} = \sqrt{\frac{\mu}{r_{\text{ГСО}}}} - \sqrt{\frac{\mu}{r_E + \Delta h}}.$$

Для разности высот орбит $\Delta h = 300$ км, определяемой международными требованиями, расчет дает $\Delta V_{\text{хар}} = 10.88$ м/с.

Время увода ОКМ на орбиту захоронения:

$$\tau_{\text{ОКМ}} = \frac{M_{\text{ОКМ}} \Delta V_{\text{хар}}}{F_{\text{ОКМ}}}.$$

Откуда находим, что при $F_{\text{ОКМ}} = 40$ мН, $\tau_{\text{ОКМ}} = 120$ ч (5 сут).

Боковая скорость ОКМ за 5 сут достигнет:

$$\Delta V_x = \frac{F_x \tau_{\text{ОКМ}}}{M_{\text{ОКМ}}} = 0.5 \text{ м/с}.$$

Смещение ОКМ в боковом направлении составит:

$$\Delta x = \frac{1}{2} \frac{F_x \tau_{\text{ОКМ}}^2}{M_{\text{ОКМ}}} = 108 \text{ км}.$$

Таким образом, наличие боковой силы может стать причиной значительного ухода ОКМ в сторону от его начального положения (сопоставимым с Δh) и возникновения большой боковой скорости, которую необходимо учитывать при управлении движением СКА.

На рис. 7 приведены результаты расчета возмущающих моментов M_y , действующих на ОКМ со стороны ионного пучка.

Средние значения M_y приведены в табл. 3.

Как можно видеть из табл. 3, величина вращающего момента $M_y \approx F_z \delta_x$, т.е. определяется, в основном, смещением точки приложения продольной силы относительно ЦМ ОКМ. Влияние коэффициентов аккомодации на средние значения M_y не существенно.

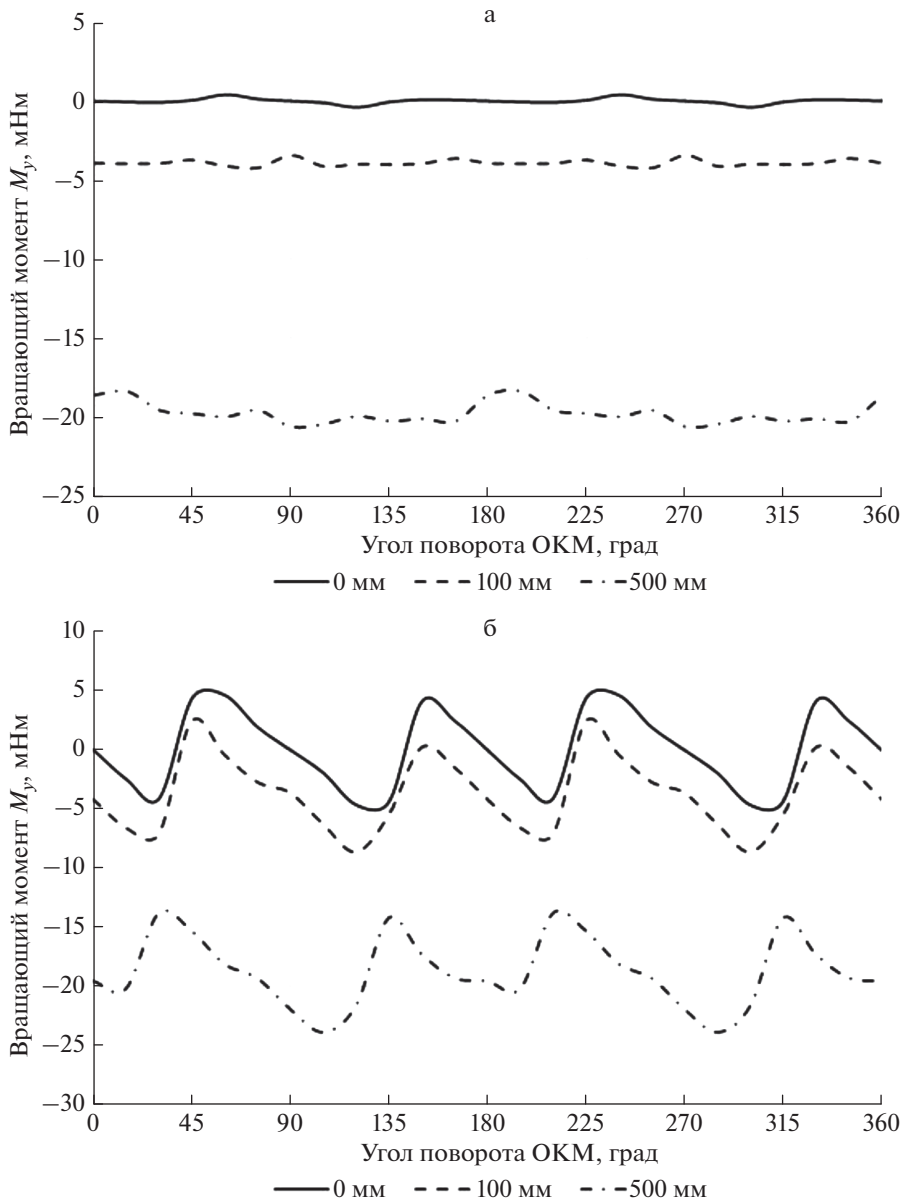


Рис. 7. Значения возмущающих моментов M_y при различных значениях прицельного параметра δ_x для режима ППИ (а) и для ЭВТИ (б).

Возмущающий момент может приводить к закрутке ОКМ вокруг его ЦМ. При возмущающем моменте $M_y = 20$ мНм угловое ускорение

$$\epsilon_y = \frac{M_y}{J} = 1.6 \times 10^{-5} \text{ рад/с}^2,$$

где J – момент инерции ОКМ ($J = 1240$ кг м²).

При этом за время увода ОКМ угловая скорость вращения (при постоянном действии момента) достигнет 7 рад/с, т.е. около 1 оборота/с.

Таким образом, при большом промахе ОКМ может начать достаточно быстро вращаться, что осложнит работу системы управления движением СКА. Нельзя исключать возможность деформаций или разрушения ОКМ за счет действия центробежной силы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование механического воздействия на ОКМ слабо расходящегося ионного пучка ксенона с током 0.5 А и энергией 4 кэВ. В качестве ОКМ техногенной природы принят разгонный блок “Бриз-М” с габаритами $\varnothing 2490 \times 2654$ мм и массой 1600 кг. Расчеты проводились при различных значениях прицельного параметра и значениях коэффициентов аккомодации для режима полного поглощения импульса и для реального материала – экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ).

Получено расчетом, что для реальных материалов средняя боковая сила, действующая на ОКМ, может достигать 5% от тяги ионной пушки. При этом за время увода (5 сут) происходит смещение ОКМ от начального положения почти на 100 км, а боковая скорость движения ОКМ достигает 0.5 м/с.

Ошибка прицеливания приводит к возникновению значительных вращающих моментов $M_y \approx P\delta_x$. Так, при ошибке прицеливания $\delta_x = 500$ мм, величина вращающего момента составляет 20 мНм. При постоянном действии такого момента за время увода происходит раскручивание ОКМ до частоты вращения около 1 оборота в секунду.

Таким образом показано, что ошибка прицеливания и значения коэффициентов аккомодации ОКМ оказывают значительное влияние на величины возмущающих усилий и моментов, действующих на ОКМ. Учет этих факторов необходим при проектировании системы управления СКА.

Также следует отметить, что поскольку априори положение ЦМ ОКМ и коэффициенты аккомодации его поверхности, как правило, неизвестны, для их определения может быть применен метод решения обратной задачи по результатам наблюдения за движением ОКМ при воздействии на него ионного пучка. Однако для практической реализации этого метода требуется мощная система наблюдения за ОКМ, позволяющая идентифицировать его геометрию и положение в пространстве в реальном масштабе времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kitamura S.* Large Space Debris Reorbiter Using Ion Beam Irradiation [Text] / Paper IAC–10–A6.4.8, The 61st International Astronautical Congress. 2010. Prague, CZ.
2. Международная заявка WO 2011110701 A1. System for Adjusting the Position and Attitude of Orbiting Bodies Using Guide Satellites / С. Bombardelli, A.J. Pelaez (Испания). Заявл. 11.03.2010; Оpubл. 15.09.2011.
3. *Bombardelli C.* Ion Beam Shepherd for Asteroid Deflection / С. Bombardelli, J. Pelaez // *J. Guidance Control Dynamics*. 2011. V. 34(4). P. 1270–1272.
4. *Шувалов В.А., Горев Н.Б., Токмак Н.А., Кочубей Г.С.* Физическое моделирование длительного воздействия плазменной струи на объект “космического мусора”, *Космические исследования*. 2018. Т. 56. № 3. С. 243–251.
5. *Надирадзе А.Б., Обухов В.А., Покрышкин И.И., Попов Г.А., Свотина В.А.* Моделирование силового и эрозионного воздействия ионного пучка на крупный объект космического мусора техногенной природы. *Известия академии наук. Энергетика*. № 2. 2016. С. 146–157.
6. *Баранцев П.Г.* Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями. М.: Наука, 1975.
7. *Шувалов В.А.* Моделирование взаимодействия тела с ионосферой. Киев, Наукова думка, 1995. 179 с.
8. *Nadiradze A.B., Obukhov V.A., Popov G.A., Svatina V.V.* Modelling of Force Impact on Large-Sized Object of Space Debris by Ion Injection. IEPС-2015, Hyogo-Kobe, Japan, 2015.

Mechanical Impact of Ion Beam on a Large Object of Man-Made Space Debris**A. B. Nadiradze^{a,*}, R. R. Rakhmatullin^{a,**}, V. A. Obukhov^b, and V. V. Svtina^b**^a*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation*^b*Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics of the Moscow Aviation Institute (RIAME MAI), Moscow, Russian Federation***e-mail: nadiradze@mai.ru****e-mail: riame@sokol.ru*

The method of removal of large space debris objects (SDO) by the ion beam impact (Ion Shepherd) can be extremely efficient, especially with respect to the SDO removal from the region of geostationary orbit (GEO). However, such method is associated with a number of serious problems caused by the effects of the ion beam interaction with the SDO surface. This paper presents simulation of mechanical impact on the SDO by a weakly divergent xenon ion beam with a current of 0.5 A and an energy of 4 keV. The upper stage “Breeze-M” is considered as an SDO of technogenic nature. We studied the influence of the ion beam aim accuracy and of the accommodation coefficients of materials of the SDO external surface on the magnitudes of the disturbing forces and torques acting on the SDO. It is shown that even small differences in the accommodation coefficients of the real material and of the ideal one, with which the interaction occurs with full absorption of the impulse, lead to a lateral force capable of displacing the SDO to hundreds of kilometers from its initial position during the removal. Error in the ion beam aiming leads to significant torques capable of causing the SDO rotation with an angular velocity of up to 1–2 revolutions per second.

Keywords: space debris, spacecraft, ion beam, accommodation coefficients, mechanical action