

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МАТЕМАТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ТРУДЫ СЕМИНАРА
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ
В МЕХАНИКЕ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ»

2021–2022 гг.

Санкт-Петербург
«Наука»
2022

ББК 22.25

T78

Редакционная коллегия

д-р физ.-мат. наук, проф., член-корр. РАН *А. К. Беляев*
(научн. руковод. семинара) (ИПМаш РАН),
канд. физ.-мат. наук, доц. *А. Л. Смирнов* (редактор) (СПбГУ),
канд. физ.-мат. наук, доц. *И. М. Архипова* (отв. секретарь)
(ВИ(ИТ) ВА МТО),
PhD, Sr. lecturer *Е. И. Атрощенко*
(Ун-т Нового Южного Уэльса, Австралия),
д-р физ.-мат. наук, проф. *С. М. Бауэр* (СПбГУ),
канд. физ.-мат. наук, доц. *Е. Б. Воронкова* (СПбГУ),
д-р техн. наук, проф. *В. Н. Емельянов* (БГТУ),
д-р физ.-мат. наук, проф. *Е. Ф. Жигалко* (ПГУПС),
д-р физ.-мат. наук, проф. *Г. И. Михасев* (БГУ, Беларусь),
д-р физ.-мат. наук, проф. *С. П. Помыткин* (СПб ГУАП),
д-р техн. наук, проф. *С. В. Сорокин* (Ун-т Ольборга, Дания),
д-р физ.-мат. наук, проф. *С. Б. Филиппов* (СПбГУ),
канд. физ.-мат. наук *Д. В. Франус* (Фонд «УниШанс»)

T78

Труды семинара «Компьютерные методы в механике сплошной среды». 2021–2022 гг. – СПб.: Наука, 2022. – 130 с.

ISSN 2218-7421

ISBN 978-5-02-040494-6

В сборнике представлены результаты исследований по механике сплошной среды, в основном задач колебаний и устойчивости упругих конструкций. Характерной чертой исследований является использование разнообразных компьютерных методов: методов вычислительной механики сплошной среды, компьютерной алгебры, визуализации и др. Анализ опирается на сопоставление данных, полученных в различных подходах, причем наиболее часто сопоставляются результаты, полученные асимптотическими методами и по методу конечных элементов.

Издание адресовано исследователям, специализирующимся в области применения компьютерных методов в механике сплошной среды. Семинар проводится математико-механическим факультетом Санкт-Петербургского государственного университета совместно с Институтом проблем машиноведения РАН.

ISSN 2218-7421

ISBN 978-5-02-040494-6

ББК 22.25

- © Институт проблем машиноведения РАН, 2022
- © Редакционно-издательское оформление. Издательство «Наука», 2022



Некоммерческая организация «Фонд содействия математическому образованию и поддержки исследований в области точных наук «УниШанс» при финансовой поддержке инвестиционно-строительной группы «МАВИС»



МАВИС
ИНВЕСТИЦИОННО-СТРОИТЕЛЬНАЯ ГРУППА

ДЕФОРМАЦИЯ КРУГЛОЙ, ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА

НАУМОВА Н.В., ЯКОВЛЕВ А.Б., ИВАНОВ Д.Н., ДОРОФЕЕВ Н.П.

В настоящее время активно исследуются изменение характеристик космического паруса во время эксплуатации. Парус обычно представляется как тонкая пленка, натянутая на каркас. В процессе полета эта пленка претерпевает деформации под действием ряда факторов, что влияет на эффективность и траекторию.

В данной работе предлагается модель паруса в виде круглой пластины радиуса до 50 метров, состоящей из трех слоев (алюминий, майлар, алюминий). Майларовая пленка толщиной 2 мкм заключена между двумя более тонкими алюминиевыми пленками, толщиной 0.2 мкм. В результате численных расчетов в конечноэлементном пакете ANSYS получены значения максимальных прогибов пластины в зависимости от её радиуса. В дальнейшем планируется получить аналитическое решение рассматриваемой задачи и провести сравнение аналитических и численных результатов. Предложенная модель может помочь при прогнозировании движения реальных космических парусов и управления их ориентацией в космическом пространстве.

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие космических исследований, особенно при осуществлении полетов вблизи границ Солнечной системы, требует исследования возможностей использования альтернативных двигательных систем. В научной и научно-популярной литературе [8], [4] активно обсуждается применение для таких целей предложенного Фридрихом Артуровичем Цандером солнечного паруса. На данный момент решено большое количество траекторных задач, задач управления и оптимизации движения с учетом множества факторов космического пространства, в частности эффекта тени Земли. Важным направлением исследования возможности использования космических аппаратов (КА) с солнечным парусом является изучение влияния различных факторов космического пространства на работо-

Доклад на семинаре 29 марта 2022 г.

© Наумова Н.В., Яковлев А.Б., Иванов Д.Н., Дорофеев Н.П., 2022

способность указанных КА. В частности, в [9] исследовано влияние деградации и изменения отражательной способности поверхности паруса на его динамику. Известно, что тела, находящиеся в космической плазме, приобретают электрический заряд, зависящий от плотности и температуры плазмы, величины потока солнечного излучения и электрофизических характеристик тела, а, таким образом, от положения и ориентации тела в процессе движения. Однако зарядка тонких пленок в отличие от ранее рассмотренных процессов зарядки тел в космической плазме [1], [12], [6] обладает рядом особенностей. Наиболее важной из них является частичная проницаемость пленки для заряженных частиц космической плазмы [3]. В работе [11] показано, что зарядка поверхности солнечного паруса фактически не влияет на движение КА с парусом при перелетах Земля–Марс и Земля–Юпитер, если поверхность паруса остается плоской в процессе движения. Это связано с крайне малыми величинами напряженности межпланетного магнитного поля. Однако, наведенный на поверхности паруса электрический заряд может привести к деформации поверхности, что в свою очередь изменит эффективную площадь его поверхности. Данная работа является попыткой оценить изменение эффективной площади паруса в результате его электризации в космической плазме солнечной системы.

2. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЗАРЯДКИ БЕСКОНЕЧНОЙ ДВУХСТОРОННЕЙ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ

В действительности для солнечного паруса используется пленка из каптона с алюминиевым покрытием с двух сторон. Отметим, что при движении солнечного паруса с доступными на данный момент толщиной и другими характеристиками, необходимыми для осуществления межпланетных перелетов, в качестве модели паруса можно использовать двухстороннюю, бесконечную, полностью поглощающую частицы пластину из алюминия с заданным коэффициентом отражения солнечного излучения. Алюминий — материал с большим выходом фотоэмиссии, поэтому вблизи освещенной солнцем поверхности образуется двойной слой с немонотонным

распределением потенциала. Так как размеры паруса много больше величин ларморовского и дебаевского радиусов, то при моделировании поверхность можно считать бесконечно большой. Также предполагается, что

- 1) корпус КА не влияет на процесс зарядки паруса,
- 2) процесс расширения коронального газа — адиабатический (предположение используется для вычисления скорости солнечного ветра),
- 3) скорость тела много меньше скорости солнечного ветра, поэтому пластину можно считать неподвижной,
- 4) влияние границ поверхности пленки не учитывается,
- 5) известны функции распределения по скоростям заряженных частиц на бесконечности и фотоэлектронов на поверхности паруса,
- 6) на верхней (со стороны Солнца) стороне пластины распределение электростатического потенциала немонотонное,
- 7) на обратной стороне пластины распределение электростатического потенциала монотонное,
- 8) потенциалы на обеих поверхностях пластины одинаковые.

Как показано в [2], в окрестности Земли функцию распределения фотоэлектронов для алюминиевой пластины можно считать полумаксвелловской с концентрацией у поверхности $N_{\nu 0} = 1.891 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ и температурой $T_{\nu} = 0.9 \text{ эВ}$ для случая полного поглощения солнечного излучения.

При этом функции распределения для электронов и ионов солнечного ветра являются максвелловскими с $T_e = 10 \text{ эВ}$ и $N_{e0} = 9 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ (спокойный солнечный ветер) [6]. Для других расстояний от Солнца температуры сохраняются, а плотности пересчитываются исходя из:

- 1) обратной пропорциональности квадрату расстояния от Солнца для плотности фотоэлектронов и
- 2) адиабатичности расширения идеального газа и сохранения потока солнечного ветра для плотностей его протонов и ионов [5].

Таким образом, для малых углов падения солнечного излучения θ выполняется условие высокой фотоэмиссии $N_{\nu 0} \gg N_{e0}$. Поэтому над пластиной можно ожидать существование немонотонного потенциала. Потенциал электрического поля и распределение

частиц в двойном слое определяются системой уравнений Власова–Пуассона с соответствующими граничными условиями. Так как размеры паруса много больше дебаевского радиуса плазмы солнечного ветра, уравнение Пуассона становится одномерным. Для двухсторонней пластины отдельно рассматривается решение системы уравнений Власова–Пуассона в двух областях: над пластиной (зона 1) и под пластиной (зона 2):

$$\frac{d^2\Phi}{dz^2} = -\frac{e}{\varepsilon_0}(N_i - N_{e1} - N_\nu) \quad - \quad \text{для зоны 1,} \quad (1)$$

$$\frac{d^2\Phi}{dz^2} = \frac{e}{\varepsilon_0}N_{e2} \quad - \quad \text{для зоны 2.} \quad (2)$$

Здесь Φ — потенциал электрического поля, z — высота точки над поверхностью пластины, N_i , N_{e1} , N_{e2} , N_ν — концентрации ионов и электронов (в 1 и 2 зонах) солнечного ветра и фотоэлектронов соответственно, e — заряд протона, ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Как и в работах [1], [12], [6], для определения немонотонного потенциала (в зоне 1) будем использовать четыре параметра: Φ_0 — потенциал на поверхности пластины, Φ_m — минимальное значение Φ на высоте z_m , Φ_1 — значение потенциала на внешней границе двойного слоя. Для нахождения указанных величин используются 3 условия:

1. равенство нулю суммарной плотности тока на поверхность

$$j_i - j_{e1}(\psi_m) - j_{e2}(\psi_m) - j_\nu(\psi_0, \psi_m) = 0,$$

2. квазинейтральность на внешней границе двойного слоя ($\zeta \ll 1$)

$$N_{e1}(\psi_1) + N_\nu(\psi_1) = N_i,$$

3. равенство нулю напряженности электрического поля на внешней границе двойного слоя

$$\left. \frac{d\psi}{d\zeta} \right|_{\zeta \rightarrow \infty} = -|Z_2(\psi_1)|^{1/2} = 0.$$

Здесь

$$\zeta = \frac{z}{D}, \quad D = \left[\frac{\varepsilon_0 k T_e}{N_{e0} \exp(2)} \right]^{1/2}, \quad w = \frac{V_0}{V_e} \cos \theta, \quad \zeta_m = \frac{z_m}{D}, \quad \tau = \frac{T_e}{T_\nu},$$

$$V_e = \sqrt{\frac{2kT_e}{m_e}}, \quad \psi = -\frac{e\Phi}{kT_e}, \quad \psi_0 = -\frac{e\Phi_0}{kT_e}, \quad \psi_m = -\frac{e\Phi_m}{kT_e},$$

$$\psi_1 = -\frac{e\Phi_1}{kT_e}, \quad \Psi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt,$$

$$N_{e1} = \frac{N_{e0}}{2\sqrt{\pi}} \exp(-w^2) \left[\int_\psi^\infty \frac{\exp(-t + 2w\sqrt{t})}{\sqrt{t - \psi}} dt \mp \int_\psi^{\psi_m} \frac{\exp(-t + 2w\sqrt{t})}{\sqrt{t - \psi}} dt \right],$$

$$N_{e2} = \frac{N_{e0}}{2\sqrt{\pi}} \exp(-w^2) \int_\psi^\infty \frac{\exp(-t - 2w\sqrt{t})}{\sqrt{t - \psi}} dt,$$

$$N_\nu(\psi) = \cos \theta \frac{N_{\nu 0}}{2} \exp(\tau\psi_0 - \tau\psi) \left[1 \pm \Psi(\sqrt{\tau\psi_m - \tau\psi}) \right],$$

$$j_{e1}(\psi_m) = N_{e0} \frac{V_e}{2\sqrt{\pi}} \left\{ \exp \left[-(w - \sqrt{\psi_m})^2 \right] + \sqrt{\pi} w \left[1 + \Psi(w - \sqrt{\psi_m}) \right] \right\},$$

$$j_{e2}(\psi_m) = N_{e0} \frac{V_e}{2\sqrt{\pi}} \left\{ 1 - \sqrt{\pi} w \right\},$$

$$j_\nu(\psi_0, \psi_m) = -\cos \theta N_{\nu 0} \frac{V_e}{2\sqrt{\pi}\sqrt{\tau}} \exp(\tau\psi_0 - \tau\psi_m), \quad j_i = N_i V_0 \cos \theta,$$

$$Z_{1,2}(\psi) = -2(\psi_m - \psi) + \exp(-\psi) \left[1 \mp \Psi(\sqrt{\psi_m - \psi}) \right] - \exp(-\psi_m) \times$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{A}{\tau} \exp[(1 - \tau)\psi_m] \right\} + \frac{A}{\tau} \exp[-\tau\psi] \times \left[1 \pm \Psi(\sqrt{\tau\psi_m - \tau\psi}) \right] \pm$$

$$\pm \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\psi_m - \psi} \exp(-\psi_m) \times \left\{ 1 - \frac{A}{\sqrt{\tau}} \exp[(1 - \tau)\psi_m] \right\} +$$

$$+ w \int_\psi^{\psi_m} F_{1,2}(\psi, \psi_m) d\psi,$$

$$A = \frac{N_{\nu 0}}{N_{e0}} \cos \theta \exp(\tau \psi_0), \quad F_{1,2}(\psi, \psi_m) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \exp(-\psi) \times \\ \times \left[\int_0^{\infty} \exp(-x^2) \sqrt{x^2 + \psi} dx \mp \int_0^{\sqrt{\psi_m - \psi}} \exp(-x^2) \sqrt{x^2 + \psi} dx \right].$$

Здесь верхний знак относится к области $0 \leq \zeta \leq \zeta_m$, нижний — к области $\zeta_m < \zeta < \infty$ зоны 1, V_0 скорость солнечного ветра, плотность ионов $N_{i0} = N_{e0}$, m_e — масса электрона, k — постоянная Больцмана. В новых переменных решение уравнения 1 находится путем интегрирования

$$\zeta = \zeta_m \mp \int_{\psi}^{\psi_m} \frac{1}{\sqrt{Z_{1,2}(\psi)}} d\psi,$$

где

$$\zeta_m = \int_{\psi_0}^{\psi_m} \frac{1}{\sqrt{Z_1(\psi)}} d\psi.$$

Аналогично решается уравнение 2. Зная распределение потенциала вблизи каждой из поверхностей пластины, находим напряженность электрического поля вблизи поверхностей. Затем, используя теорему Гаусса, мы определяем плотности электрического заряда на обеих поверхностях.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ ПАРУСА

В программном комплексе ANSYS Academic Research v.14 [7] нами была создана конечно-элементная модель солнечного паруса (см. рис.1). Использовался трехслойный восьми узловый элемент SHELL91, предназначенный для моделирования тонких слоистых оболочек. Область, занимаемая пластиной, была разбита более, чем на 10 000 элементов. На данном этапе работы, когда нужно было проверить наличие/отсутствие прогибов пластины от действия поверхностного заряда, сетка была выбрана в автоматическом режиме (на усмотрение самой программы ANSYS). Но этот факт, как известно, не влияет на результат, а позволяет лишь сократить время расчета. В дальнейших исследованиях, при увеличении радиуса

пластины, безусловно, будет поставлен вопрос об оптимизации сетки.

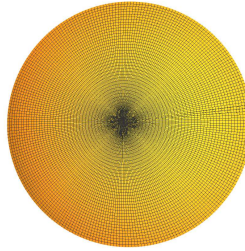


Рис. 1. Разбиение пластины на элементы

Как уже отмечалось, в дальнейших исследованиях солнечный парус аппроксимировался круглой трехслойной пластиной/оболочкой. Внутренний слой пластины — майларовая пленка — имеет толщину d . Внешние слои являются очень тонкой алюминиевой пленкой, толщиной в одну десятую d . Свойства материалов, составляющих пластину, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства материалов пластины.

Материал	Модуль Юнга, 10^{10} Н/м^2	Коэффициент Пуассона
Алюминий	70.0	0.3
Майлар	0.25	0.3

На нижней и верхней сторонах поверхности паруса равномерно распределен электрический заряд плотности σ_1 и σ_2 , соответственно. Мы считаем, что под действием появившейся поверхностной силы рассматриваемая пластина/оболочка деформируется как часть поверхности сферы, то есть справедливо следующее выражение для

поверхностной силы [10]:

$$T = 2\pi \cdot k_0 \cdot \sigma_i^2 \cdot R, \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

где постоянная $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ м}^2/\text{Кл}^2 \cdot \text{Н}$, а R — радиус кривизны поверхности (в метрах).

Для задания граничных условий краев пластины, которые не препятствовали бы деформации пластины, а создавали бы эффект свободных краев паруса, так называемый, «эффект невесомости», мы поступили следующим образом: по периметру круглой пластины/оболочки было добавлено «мягкое» кольцо, которое, в свою очередь, по своему внешнему радиусу шарнирно заделывалось. Таким образом, наша исследуемая пластина, сопряженная с круговым кольцом, может свободно изгибаться, внешнее кольцо ей не препятствует и в научное рассмотрение вообще не попадает. В момент написания данной статьи стало известно, что в последних версиях ANSYS уже введен элемент "Weak Springs" (Слабые пружины), который, как раз, предназначен для таких целей. В дальнейшем, нами планируется попробовать этот способ, задать по периметру нашей пластины множество слабых пружин и сравнить результаты. Внешний радиус (для кольца) в 50 раз больше внутреннего радиуса (для основной рассматриваемой пластины). Как видно из 3, сила T распределенного заряда зависит от радиуса кривизны поверхности паруса. Поэтому для того, чтобы задать силу нам необходимо ввести какой-либо начальный радиус кривизны, затем произвести расчет деформации пластины под действием приложенной силы. Получив новую деформационную форму пластины необходимо вторично рассчитать радиус кривизны её поверхности. Чтобы определить радиус кривизны деформированной пластины после приложения поверхностных сил, находятся координаты 4 точек пластины. Наконец, по этим точкам определяется новый радиус, который сравнивается с тем, что был предположен изначально. Получается итерационный процесс, который останавливается при достижении заданной точности. Окончательная цель расчетов — определить такой радиус кривизны пластины, который сохранялся бы после приложения поверхностной силы. Расчет радиуса кривизны поверхности по координатам четырех её точек можно найти в любом справочнике по высшей математике и здесь не приводится. Для этого нужно всего

лишь знать координаты точек, что позволит рассчитать соответствующие определители, составленные из коэффициентов первой и второй квадратичной формы поверхности. Авторами статьи была написана отдельная программа в пакете Mathematica, которая работает с результатами Nodes Solution (Coordinates), получаемыми из соответствующей программы ANSYS, написанной на языке APDL.

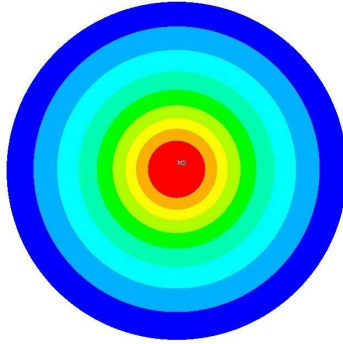


Рис. 2. Деформация пластины под действием заряда (вид сверху)

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты проводились для двух наборов поверхностных плотностей в $\text{Кл}/\text{м}^2$: $\sigma_1 = 1.719 \cdot 10^{-10}$ и $\sigma_2 = 3.41278 \cdot 10^{-13}$ (в окрестности Земли) и $\sigma_1 = 1.1507 \cdot 10^{-9}$ и $\sigma_2 = 2.7941 \cdot 10^{-12}$ (в окрестности Солнца). Результаты, полученные для парусов с радиусами до 50 метров, при $d = 2$ мкм, оформлены в таблицу. Анализ результатов расчетов, представленных в таблицах 2 и 3, показывает, что при рассмотрении деформированного состояния космического паруса, нельзя пренебрегать его прогибом за счет поверхностно распределенного заряда. С увеличением радиуса круглой пластины такая деформация поверхности только увеличивается.

Таблица 2. Деформация пластины в зависимости от радиуса в окрестности Солнца.

Радиус пластины, м	Начальный радиус кривизны, м	Конечный радиус кривизны, м	Максимальный прогиб, м
10	120.9	120.99	0.42
20	121.1	121.14	1.65
30	121.1	121.15	3.72
40	121.2	121.19	6.62
50	121.3	121.27	10.34

Таблица 3. Деформация пластины в зависимости от радиуса в окрестности Земли.

Радиус пластины, м	Начальный радиус кривизны, м	Конечный радиус кривизны, м	Максимальный прогиб, м
10	809.6	809.63	0.06
20	810.8	810.71	0.25
30	810.7	810.79	0.56
40	811.2	811.22	0.99
50	811.7	811.80	1.55

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в рамках данной работы расчеты подтверждают наши предположения о деформации пластины за счет поверхностно распределенного заряда. С увеличением радиуса пластины максимальный прогиб пластины также возрастает. Эти деформации, неучтенные ранее в научных исследованиях, способны существенно повлиять на динамику полета космического паруса. Пакет подготовленных нами компьютерных программ может быть применен в военно-космических разработках. Начиная с радиуса 50 м и больше, пластина не держит свою форму, на поверхности появляются вмятины, и радиус кривизны в различных точках поверхности резко

изменяется. Для удержания формы пластины нужны поперечные ребра жесткости.

6. БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Ресурсному Центру "Вычислительный центр СПбГУ" за предоставленную возможность проведения расчетов с использованием программного комплекса ANSYS Academic Research v.14.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Fu J H M*, Surface potential of a photoemitting plate, *J. Geophys. Res.* 76 10 2506–09, 1971.
2. *Grard R.J.L.*, Properties of the Satellite Photoelectron Sheath Derived from Photo-emission Laboratory Measurements, *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. No. 16. P. 2885–2906.
3. *Kolesnikov E K* and *Yakovlev A B*, Harnessing power from solar wind particles captured in the Van Allen belts, *Acta Futura* 3, 2009, 81–88.
4. *Korolev V. S.*, *Polyakhova E. N.* and *Pototskaya I. Yu.*, Problem of control motion of solar sail spacecraft in the photogravitational fields, *Nonlinear Systems. Theoretical Aspects and Recent Applications* ed W Legnany and T E Moschandreou (London: IntechOpen), 2020, p 205.
5. *Tien J. Y.*, *Akasofu S. I.* and *Chapman S.*, *Solar-Terrestrial Physics*, Oxford: Clarendon Press, 1972.
6. *Москаленко А. М.*, Электростатический потенциал у поверхности Луны, *Кинематика и физика небесных тел* 8 5, 1988, 31–40.
7. *Наумова Н. В.* и *Иванов Д. Н.*, Исследование статических деформаций, колебаний и устойчивости конструкций в пакете ANSYS. Учебное пособие. СПб., 2007.
8. *Поляхова Е. Н.*, *Космический полет с солнечным парусом*, Москва: Наука, 1988.
9. *Поляхова Е. Н.*, Влияние износа зеркальной пленки под действием космических факторов на динамику движения солнечного паруса в канделеровской ориентации по гелиоцентрической орбите, *Гагаринские научные Чтения по космонавтике и авиации* (Москва, 1983–1984), 1985, 62 с.
10. *Тихонов А. А.* и *Яковлев А. Б.*, Влияние наводимого на поверхности солнечного паруса электрического заряда на его прочностные характеристики, *Международная научная конференция по механике — Девятое поляховские чтения* (Санкт-Петербург, Март 9–12, 2021) (Санкт-Петербург: ВВМ) 172 с.

11. *Яковлев А. Б.*, Влияние наводимого на поверхности солнечного паруса электрического заряда на динамику паруса, который движется по канделеровской траектории, Международная научная конференция по механике — Девятыне поляховские чтения (Санкт-Петербург, Март 9–12, 2021) (Санкт-Петербург: ВВМ) 180–181 с.
12. *Yakovlev A. B.*, The corrected method for calculation of electrostatic potential near to surface of nonatmospheric space body and the analysis of possible modes of dust particles motion, Proc. Int. Conf. on Mechanics — Seventh Polyakhov's Reading (Saint-Petersburg, Febr. 2–6, 2015). (IEEE) doi:10.1109/POLYAKHOV.2015.7106785.

Научное издание

**ТРУДЫ СЕМИНАРА «КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ
В МЕХАНИКЕ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ»**

2021–2022 гг.

Утверждено к печати

Редакционно-издательским советом

Математико-механического факультета

Санкт-Петербургского государственного университета и

Ученым советом Института проблем машиноведения

Российской академии наук

Редактор *М. В. Орлова*

Художник *П. Э. Палей*

Отпечатано с готового оригинал-макета

Подписано в печать 00.00.2022. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл.-печ. л. 0.00. Уч.-изд. л. 0.0.

Тираж 110 экз. Заказ № 994

ФГУП «Издательство «Наука» 117997 г. Москва, ул. Профсоюзная, 90
тел. +7(495)276-77-35, e-mail: info@naukaran.com, <https://naukapublishers.ru>
<https://naukabooks.ru>

Санкт-Петербургский филиал ФГУП «Издательство «Наука»

199034 г. Санкт-Петербург, 9-я линия В. О., 12/28

тел. +7(812)655-65-01, e-mail: secretspb@naukaran.com