



Государственное бюджетное образовательное учреждение лицей № 1511 при МИФИ

Назаров Владимир

Научный руководитель Ф.В. Григорьев, к.х.н., н. с. НИВЦ МГУ, доц. каф. физики НИЯУ «МИФИ»

Солнечный ветер - в паруса

Аннотация В настоящее время известны проекты, предлагающие использовать для перемещения в межпланетном пространстве давление солнечного света или солнечного ветра – потока ионизированных частиц, испускаемых из короны Солнца. Вследствие малости давления ($\sim 10^{-6}$ Па для света и 10^{-9} Па для ветра на орбите Земли) размеры паруса должны быть значительными. Однако в случае солнечного ветра структура паруса может быть разреженной (поскольку заряженные частицы взаимодействуют на достаточно большом расстоянии), что создает условия для существенного снижения веса единицы площади «ветряного» паруса в сравнении со «световым». В настоящей работе рассмотрена структура «ветряного» паруса в виде квадратной сетки с зарядами чередующегося знака в ее узлах, оценены величина заряда и длина ребра сетки на основе данных о скорости, концентрации и температуре солнечного ветра.

Цель проекта. Оценка параметров паруса, использующего солнечный ветер для перемещения в межпланетном пространстве.

Введение. В конце XIX века Петр Лебедев, профессор Московского университета, впервые экспериментально доказал, что свет оказывает давление на поверхность. В двадцатых годах Фридрих Цандер предложил использовать это давление для межпланетных полетов. Корабль, оснащенный солнечным парусом, не будет нуждаться в топливе и двигателях. Еще одна аналогичная возможность связана с использованием для движения в космосе солнечного ветра – потока заряженных частиц, испускаемых из короны Солнца [1]. Фотон, чтобы оказать давление на парус, должен поглотиться (или отразиться) его поверхностью. Поскольку заряженные частицы способны «чувствовать» друг друга на большом расстоянии, «ветряной» парус может представлять собой разреженную структуру типа сетки (рис. 1), и за счет этого масса единицы площади будет меньше, чем для «светового» паруса.

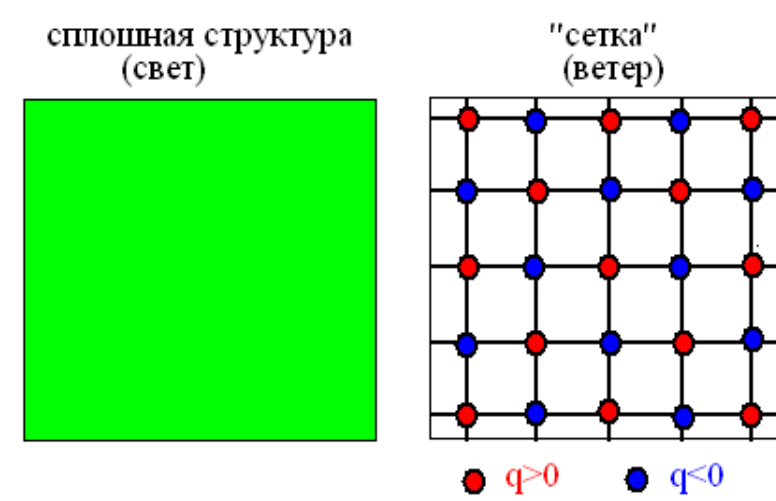


Рисунок 1. Структура паруса, работающего на эффекте давления света (слева) и солнечного ветра (справа). В последнем случае парус представляет собой сетку, в узлах которой находятся чередующиеся положительные и отрицательные заряды.

В этом случае «ветряной парус» может иметь преимущество перед солнечным даже с учетом того, что давление света $\sim 10^6$ Па существенно больше, чем давление ветра $\rho v^2 \sim 10^9$ Па (плотность оценена по концентрации частиц в солнечном ветре, скорость см. таблицу).

В нашей работе проводится оценка силы тяги, сообщаемого космическому кораблю солнечным ветром, приводятся параметры «сеточного» паруса.

Расчет взаимодействия солнечного ветра с зарядом в узле сетки. Известно [1], что в основном солнечный ветер состоит из электронов, протонов и ядер атомов гелия (альфа-частицы); ядра других элементов и неионизированных частиц содержатся в незначительном количестве.

Таблица. Средние характеристики солнечного ветра на орбите Земли.

Параметр	Концентрация n , см ⁻³	Скорость V , км/с	Температура, К
Величина	~ 10	~ 500	$\sim 10^5$

Поскольку масса электрона гораздо меньше, чем масса протона и альфа-частицы, можно считать, что парус будет в основном получать импульс от положительно заряженных частиц.

Оценим импульс в единицу времени, получаемый зарядом Q и массой M , находящимся в узле сетки в результате взаимодействия с солнечным ветром. Для оценки будем предполагать, что узел сетки взаимодействует с потоком равномерно движущихся со скоростью v положительно заряженных частиц (заряд каждой частицы e , масса m) с концентрацией n (рис. 2.).

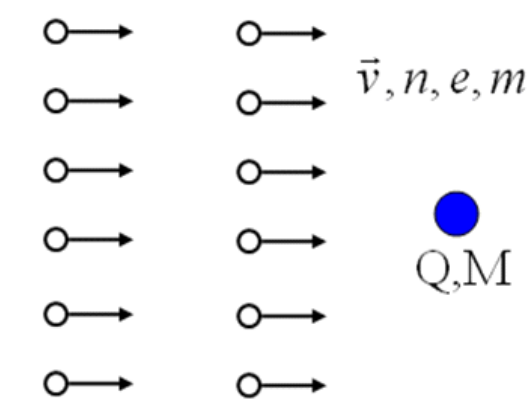
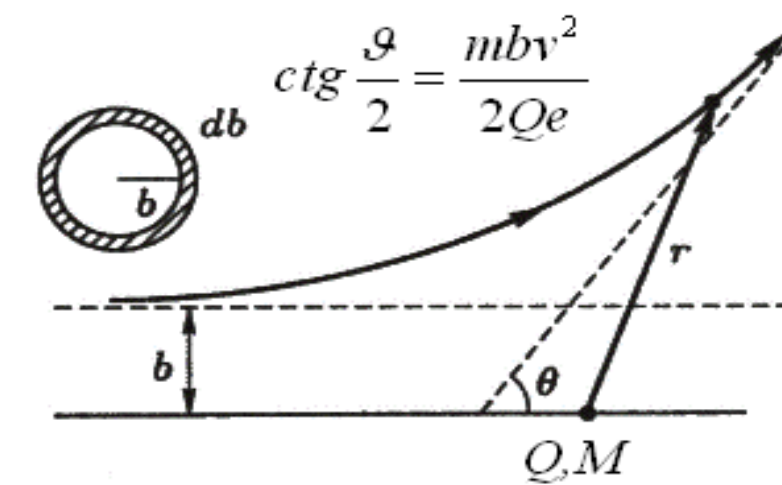


Рисунок 2. Модель взаимодействия заряда сетки с солнечным ветром.



$m \ll M$; $\Delta P = 2mv(1 - \cos \vartheta)$
 ΔP - импульс, переданный центру (Q, M)
от двух симметрично летящих частиц

Рисунок 3. К вычислению импульса, передаваемого потоком заряженных частиц массивному заряженному центру.

Импульс dP , передаваемый в единицу времени центру частицами, которые рассеиваются в угол от θ до $\theta + d\theta$ при условии $M \gg m$ равен (см. рис. 3)

$$dP = mv(1 - \cos \vartheta) dn \quad (1),$$

где dn - число частиц, рассеивающихся в угол от θ до $\theta + d\theta$. Учитывая геометрию задачи, а также связь между прицельным параметром b и углом рассеяния θ , можно записать (см. рис. 3):

$$dn = 2\pi J b db = 2\pi J \left(\frac{2Qe}{mv^2} \right)^2 \operatorname{ctg} \frac{\vartheta}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{\vartheta}{2} \right)' d\vartheta \quad (2)$$

J - плотность потока частиц, $J = nv$. Тогда переданный в единицу времени импульс равен

$$P = 2\pi J \int_{\vartheta_{\min}}^{\vartheta_{\max}} \left(\frac{2Qe}{mv^2} \right)^2 2mv(1 - \cos \vartheta) \operatorname{ctg} \frac{\vartheta}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{\vartheta}{2} \right)' d\vartheta = \frac{16\pi n(Qe)^2}{mv^2} \ln \left(1 + \left(\frac{mv^2 b_{\max}}{2Qe} \right)^2 \right) \quad (3)$$

В (3) мы учли то, что максимальный угол отклонения $\theta_{\max} = \pi$ (лобовое соударение), а минимальный угол отклонения соответствует максимальному значению прицельного параметра b_{\max} (связь между прицельным параметром b и углом рассеяния θ см. рис. 3).

При оценке величины b_{\max} необходимо учесть, что солнечный ветер следует рассматривать как плазму, а заряд в плазме экранируется. Характерный радиус экранирования r в плазме с температурой T можно вычислить так [2]:

$$r = \sqrt{\frac{T}{4\pi n e^2}} \approx 10M \quad (4)$$

Используя (3, 4), оценим теперь величину заряда в узле сетки Q . Предположим, что в результате взаимодействия с узлом сетки одноименно заряженные частицы поменяли импульс на противоположный. Тогда импульс P , переданный узлу сетки, в единицу времени, будет равен (рис. 4):

$$P = 2\pi n m v^2 b_{\max}^2 \quad (5)$$

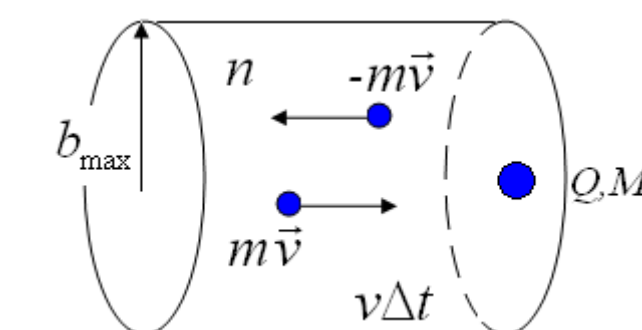


Рисунок 4. К оценке импульса, передаваемого потоком заряженных частиц массивному заряженному центру при условии изменения импульса частиц на противоположный.

Приравнивая (3) и (5), а также пренебрегая логарифмической частью выражения (3), получаем:

$$Q \cong \frac{mv^2 b_{\max}}{2\sqrt{2}e} \approx 10^{-8} \text{ Кл} \quad (6)$$

Параметры паруса. Таким образом, предложенный нами парус (рис.1 справа) обладает следующими основными параметрами:

- Модуль заряда в узле сетки $\sim 10^{-8}$ Кл,
- Ребро сетки (расстояние между ближайшими зарядами) $\sim 10^1-10^2$ м

Парус с такими параметрами способен обеспечить давление $\sim 10^{-9}$ Па на орбите Земли.

Приведенная длина ребра сетки должна быть порядка двух радиусов экранирования (4), что обеспечит независимость взаимодействия каждого из узлов сетки с солнечным ветром. В случае, если длина ребра сетки не будет удовлетворять этому условию, поле ближайших положительного и отрицательного зарядов будут частично компенсироваться, что приведет к уменьшению эффекта взаимодействия паруса с ветром.

Оценим характерный размер паруса для перемещения объектов в межпланетном пространстве. Предполагая, что парус движется равноускоренно (хотя это не совсем так вследствие уменьшения давления ветра по мере удаления от Солнца, а также из-за воздействия других факторов) в течение времени t и проходит путь L , запишем

$$L = \frac{at^2}{2} = \frac{pSt^2}{2M} \quad (7)$$

($p \sim 10^{-9}$ Па, S - площадь паруса). Принимая $L \approx 10^8$ км (характерное расстояние в Солнечной системе), $t \approx 1$ год

(характерное время путешествия по Солнечной системе), получаем оценочную связь между массой корабля M (вместе с массой паруса) в кг и радиусом паруса r в метрах:

$$r \approx 300\sqrt{M} \quad (9)$$

Вероятно, создание значительного заряда является одной из основных технических проблем, которую необходимо преодолеть для использования солнечного ветра с целью движения в межпланетном пространстве. Кроме того, положительный заряд центра будет уменьшаться за счет притока электронов из солнечного ветра, поэтому необходимо предусмотреть механизм компенсации этого эффекта.

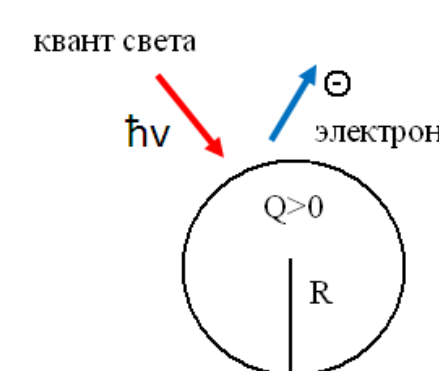


Рисунок 5. К вычислению заряда на металлическом шарике, облучаемым светом.

За счет фотоэффекта при облучении видимым светом с энергией ~ 3 В поверхность металла можно зарядить до напряжения \sim Вольт. Из выражения для потенциала ϕ заряженного шара радиуса R ($\phi = \frac{kQ}{R}$) можно получить, что для создания заряда 10^{-8} Кл радиус шара должен достигать ~ 100 метров, что больше длины ребра сетки и потому нерационально с точки зрения структуры паруса. Достичь нужных величин заряда при размерах узлов \sim см (или десятка см) можно достичь за счет фотоэффекта на ультрафиолете, однако его доля в солнечном излучении относительно невелика. Еще один способ увеличить заряд на узле связан с

использованием повышающих преобразователей напряжения (с единиц Вольт до сотен и тысяч Вольт), однако такой способ ведет к усложнению структуры паруса.

Возможная область применения аппаратов, использующих для движения солнечный ветер: исследование межпланетного пространства, в том числе дальних областей Солнечной системы; транспортировка аппаратов, обладающих собственными двигателями для орбитального маневрирования.

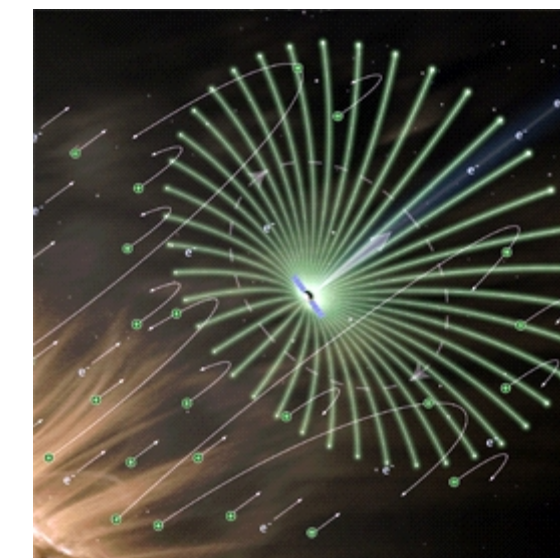


Рисунок 6. Конструкция паруса, недавно предложенная в [2].

В зонтичной конструкции паруса (рис. 6) с солнечным ветром взаимодействуют длинные (\sim десятков километров) трубки, на которых создается потенциал ~ 15 кВ, что обеспечивает силу тяги на единицу длины такой трубки около $5 \cdot 10^{-8}$ Н/м. Проблемы такой конструкции: значительные электрические поля в аппарате, необходимость поддержания заряда на трубках. Для оценки возможности реализации зонтичного паруса планируется запуск двух микроспутников: EstCube 1 и Aalto 1.

Выводы.

1) В работе предложена оригинальная схема использования солнечного ветра для движения в межпланетном пространстве: нейтральная (или слабозаряженная) квадратная сетка с зарядами в узлах, причем соседние заряды имеют противоположные знаки.

2) На основе предложенной модели взаимодействия такой сетки с солнечным ветром получены оценки для длины ребра сетки (~ 10 м) и величины заряда в ее узле ($\sim 10^{-8}$ Кл). При таких параметрах на орбите Земли обеспечивается давление $\sim 10^{-9}$ Па. Приведена оценка размеров паруса в зависимости от массы космического корабля.

Список литературы.

1. Пудовкин М.И. Солнечный ветер // Соросовский образовательный журнал, 1996, No 12, с. 87–94.
2. P. Janhunen and A. Sandroos. Simulation study of solar wind push on a charged wire: basis of solar wind electric sail propulsion. Ann. Geophys., 25, 755–767, 2007.