

**МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ  
ШКОЛЬНИКОВ «СТАРТ В НАУКУ»**

**ДИПЛОМ 1 СТЕПЕНИ**

**ПОБЕДИТЕЛЬ**

**Солнечный ветер – в паруса**

*Автор: Назаров Владимир Андреевич,*

*Москва, ГБОУ лицей №1511 при НИЯУ МИФИ, 11-ый класс*

*Научный руководитель: Григорьев Федор Васильевич, н.с. НИВЦ МГУ, к. х. н., доцент  
МИФИ.*

**Цель проекта.**

Изучение возможной структуры паруса, улавливающего давление солнечного ветра и оценка параметров паруса при его использовании для перемещения в межпланетном пространстве

**Введение.** В 1899 году Петр Лебедев, профессор Московского университета, впервые экспериментально доказал, что свет оказывает давление на поверхность. В двадцатых годах пионер отечественного ракетостроения Фридрих Цандер предложил использовать это давление для межпланетных полетов. Корабль, оснащенный солнечным парусом, не будет нуждаться в топливе и двигателях. В 2007 было предложено использовать для движения в космосе солнечный ветер – поток ионизированных частиц, испускаемых из короны Солнца [1]. Разница между ними и фотонами в том, что ионизированные частицы, обладающие зарядом, способны «чувствовать» друг друга на большом расстоянии. Фотон, чтобы оказать давление на парус, должен поглотиться его поверхностью. Если же зарядить парус, то он сможет принимать ускоряющий импульс от заряженных частиц, находящихся достаточно далеко от него. Поэтому радиус действия заряженных частиц в таком «ветряном парусе» намного превосходит его размеры (рис. 1).

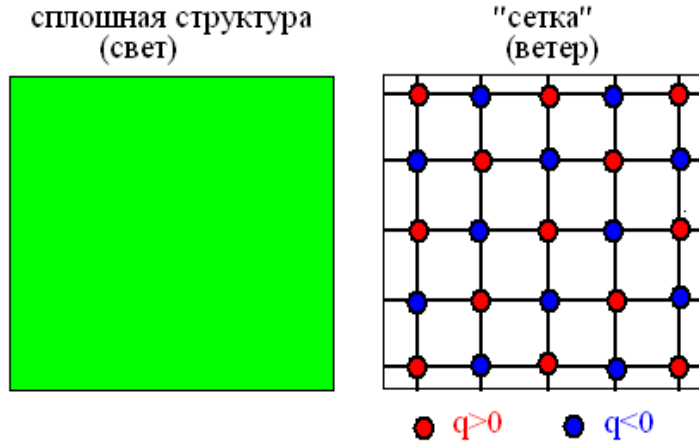


Рисунок 1. Структура паруса, работающего на эффекте давления света (слева) и солнечного ветра (справа). В последнем случае парус представляет собой сетку, в узлах которой находятся чередующиеся положительные и отрицательные заряды.

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  $\rho$  оценена по концентрации частиц в солнечном ветре, скорость  $v$  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 [2], что в основном он состоит из электронов, протонов и ядер атомов гелия (альфа-частицы); ядра других элементов и неионизированных частиц содержатся в незначительном количестве (см. таблицу).

Таблица. Средние характеристики солнечного ветра на орбите Земли.

Параметр	Концентрация $n$ , $\text{см}^{-3}$	Скорость $V$ , км/с	Температура, К
Величина	$\sim 10$	$\sim 500$	$\sim 10^5$

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

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

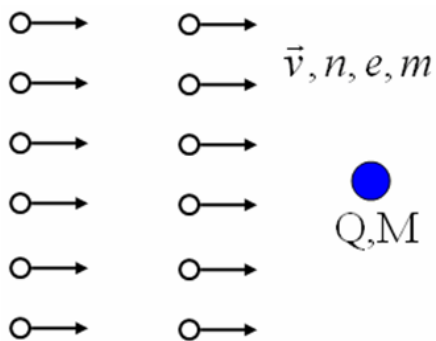
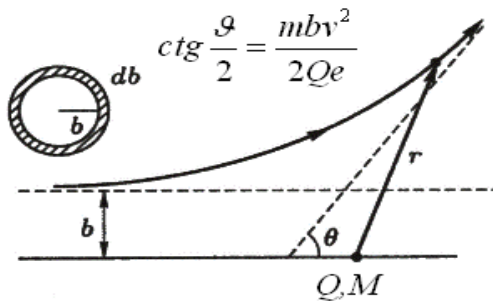


Рисунок 2. Модель взаимодействия заряда сетки с солнечным ветром.



$$m \ll M; \quad \Delta P = 2mv(1 - \cos \theta)$$

$\Delta P$  - 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  $\vartheta$  до  $\vartheta + d\vartheta$  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  $\vartheta$  до  $\vartheta + d\vartheta$ . Учитывая геометрию задачи, а также связь между прицельным параметром  $b$  и углом рассеяния  $\vartheta$ , можно записать (см. рис. 2):



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



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

При оценке величины  $b_{\max}$  необходимо учесть, что солнечный ветер следует рассматривать как плазму, а любой заряд плазме экранируется. Характерный радиус экранировки  $r$  в плазме с температурой  $T$  можно вычислить так [1]:

$$r = \sqrt{\frac{T}{4\pi n e^2}} \approx 1.6 \quad (4)$$

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

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

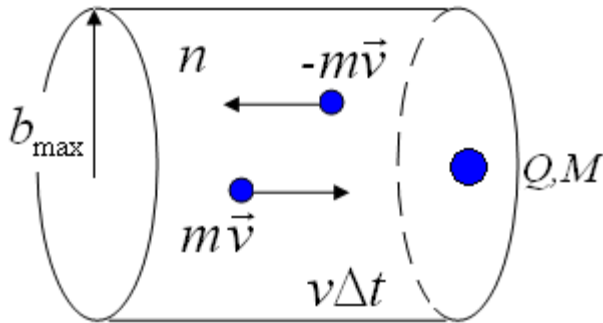


Рисунок 4. К оценке импульса, передаваемого потоком заряженных частиц массивному заряженному центру при условии изменения импульса частиц на противоположный.

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

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

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

- Модуль заряда в узле сетки  $\sim 10^{-6}$  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 стеки 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) в течение времени  $t$  и проходит путь  $L$ , запишем

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

( $p \sim 10^{-9}$  Па,  $S$  - площадь паруса). Принимая  $L \approx 10^7$  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, необходимо предусмотреть механизм компенсации этого эффекта.

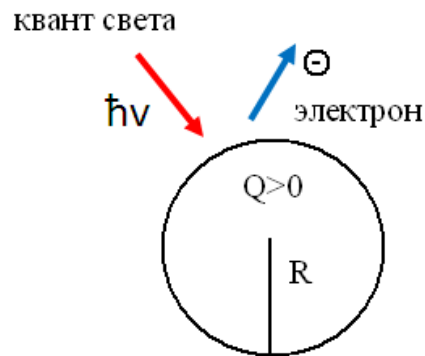


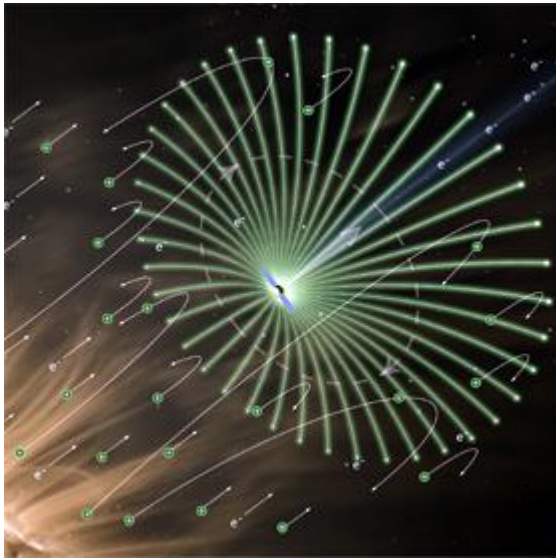
Рисунок 5. К вычислению заряда на металлическом шарике, облучаемым светом.

За счет фотоэффекта при облучении видимым светом с энергией  $\sim \text{эВ}$  поверхность металла можно зарядить до напряжения  $\sim$  Вольт. Из выражения для потенциала  $\varphi$  заряженного шара

радиуса  $R$  ( $\varphi = \frac{kQ}{R}$ ) можно получить, что для создания заряда  $10^{-6}$  Кл радиус шара должен достигать  $\sim 1000$  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 повысить 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 [2] (рис. 6) с солнечным ветром взаимодействуют длинные ( $\sim$  десятков километров) трубки, на которых создается потенциал  $\sim 15$  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.

В настоящее время нами проводится численное моделирование взаимодействия потока заряженных частиц с парусом, имеющим описанную выше конструкцию. В первом приближении предполагается, что частицы в солнечном ветре не взаимодействуют друг с другом, и на их движение влияют только заряды сетки. Таким образом, на  $i$ -ую заряженную частицу действует сила

$$\vec{F}_i = \sum_{j=1}^N -\nabla \left( \frac{keQ_j}{|\vec{r}_i - \vec{R}_j|} \exp(|\vec{r}_i - \vec{R}_j|/a) \right) \quad (10)$$

где  $a$  – радиус экранирования,  $\vec{r}_i$  - радиус-вектор  $i$ -ой частицы,  $\vec{R}_j$  - радиус-вектор  $j$ -ого частицы,  $Q_j$  - его заряд. Зная силу в каждый момент времени, начальные координаты и скорости частиц, а также предполагая, что в течение небольшого промежутка времени движение является равноускоренным, можно рассчитать координаты и скорость частиц в любой момент, вычислить изменение их импульса и импульс, переданный парусу.

Нами проводится отладка программы на языке СИ, реализующей описанный выше алгоритм. Один из критериев работоспособности программы – проверка выполнения закона сохранения энергии.

### **Выводы.**

1) В работе предложена оригинальная схема использования солнечного ветра для движения в межпланетном пространстве: электронейтральная (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 ( $\sim 10$  м) и величины заряда в ее узле ( $\sim 10^{-6}$  Кл). При таких параметрах на орбите Земли обеспечивается давление  $\sim 10^{-9}$  Па. Проведено сравнение предложенной схемы с известной ранее из литературы, а также оценка размеров паруса в зависимости от массы космического корабля.

### **Список литературы.**

1. 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.
2. Пудовкин М.И. Солнечный ветер// Соросовский образовательный журнал, 1996, No 12, с. 87–94.