
**ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

**NUCLEAR, RADIATION AND
ENVIRONMENTAL SAFETY**

УДК: 621.039.524.446

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-03>

EDN GOPZCN

Оригинальная статья / Original paper

**Нейтронное излучение источника движущегося в гравитационном поле****В.Я. Шпицер**  , **В.В. Кривин** *Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация* shpitser@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена проблеме формирования нейтронного поля вблизи эллиптических орбит космических объектов, оснащённых ядерными энергетическими установками. На высокоэнергетическую часть спектра деления гравитационное поле не оказывает влияния. Радиационная безопасность обеспечивается справедливой для точечного источника триадой: активность – расстояние – время. Для тепловой (околотепловой) части спектра возникает связь между параметрами орбиты космического объекта и плотностью потока нейтронов. Рассмотрена гипотеза образования устойчивого нейтронного следа в объёме «тора» вокруг орбиты космического объекта. В работе представлены теоретические и численные свидетельства справедливости выдвинутой гипотезы. Во введении рассматривается сепарационный эффект принципа относительности Галилея при прямолинейном равномерном движении точечного изотропного источника нейтронов на плоскости. Иллюстрируется возникновение угловой асимметрии распределения нейтронов в неподвижной системе координат, когда их относительная скорость близка к переносной скорости источника. В этих условиях также фиксируется значительная дисперсия скоростей первоначально монохроматических нейтронов. Этот ожидаемый фундаментальный кинематический эффект обуславливает характерное распределение нейтронов в гравитационном поле при движении источника по кеплеровой орбите. Решение задачи проведено в пространстве скоростей. Утверждается, что если распределение нейтронов в пространстве скоростей таково, что их скорости коллинеарны орбитальной скорости источника, то это свидетельствует о существовании потока нейтронов вблизи орбиты. Проблема анализируется на примере одного витка гипотетической космической станции методом имитационного моделирования. С этой целью в восьми точках эллиптической орбиты генерировались пакеты тепловых нейтронов с изотропным угловым распределением. В системе координат, связанной с землёй, сравнивались потоки скоростей нейтронов и источника в выбранных точках орбиты. Полученные данные позволили рассчитать плотности потоков скоростей нейтронов в переднюю и заднюю полусферы относительно движения источника по орбите как функции полярного угла, при этом фиксировалось значение определителя корреляционной матрицы – индикатора коллинеарности векторов скоростей нейтронов в потоке. Результаты исследований подтверждают выдвинутую гипотезу о возможности образования «следа» на орбите источника тепловых нейтронов, что определяет необходимость учитывать его как значимый компонент радиационного риска.

Ключевые слова: изотропный источник нейтронов, анизотропия поля, кеплеровская орбита, нейтронный след, кинематический эффект.

Для цитирования: Шпицер В.Я., Кривин В.В. Нейтронное излучение источника движущегося в гравитационном поле. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):31–39. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-03>

For Citation: Shpitser V.Ya., Krivin V.V. Neutron emission from a source moving in a gravitational field. *Global Nuclear Safety*. 2024;14(2):31–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-03>

Neutron emission from a source moving in a gravitational field**Vladimir Y. Spitzer**  , **Valery V. Krivin** *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation
 shpitser@mail.ru*

Abstract. This work is devoted to the problem of neutron field formation near elliptical orbits of space objects equipped with nuclear power plants. The high-energy part of the fission spectrum is not affected by the gravitational field. Radiation safety is ensured by the triad fair for a point source: activity-distance-time. The connection between space object orbit parameters and neutron flux density occurs for the thermal (near-thermal) part of the spectrum. The possibility of formation of a stable neutron trace in the volume of a «torus» around the orbit of a space object is considered. The paper presents theoretical and numerical evidence of the validity of the hypothesis put forward. The introduction considers the separation effect of Galileo's relativity principle in the case of rectilinear uniform motion of a point isotropic neutron source on a plane. The occurrence of angular asymmetry of the neutron distribution in a stationary coordinate system when their relative velocity is close to the transport velocity of the source is illustrated. Under these conditions, a significant velocity dispersion of initially monochromatic neutrons is also recorded. This expected fundamental kinematic effect determines the characteristic distribution of neutrons in the gravitational field when the source moves along the Kepler orbit. The solution of the problem is carried out in the velocity space. It is argued that if the distribution of neutrons in the velocity space is such that their velocities are collinear to the orbital velocity of the source, this indicates the existence of a neutron flux near the orbit. The problem is analysed on the example of one revolution of a hypothetical space station by simulation modelling. For this purpose, thermal neutron packets with isotropic angular distribution were generated at eight points of an elliptical orbit. The neutron and source velocity fluxes at the selected points of the orbit were compared in a coordinate system related to the earth. The obtained data made it possible to calculate the densities of neutron velocity fluxes to the front and rear hemispheres relative to the source orbital motion as a function of the polar angle, while the value of the determinant of the correlation matrix – an indicator of collinearity of neutron velocity vectors in the flux – was fixed. The results of the studies confirm the hypothesis put forward about the possibility of formation of a «trace» in the orbit of a thermal neutron source, which determines the need to take it into account as a significant component of radiation risk.

Keywords: isotropic neutron source, field anisotropy, Keplerian orbit, neutron trace, kinematic effect.

Введение

Для инерционных систем отсчёта (согласно принципу относительности Галилея) справедлив закон сложения скоростей: абсолютная скорость нейтрона v в покоящейся системе отсчёта (x, y, z) равна сумме переносной скорости V движущейся системы (x', y', z'), связанной с источником и относительной скорости v' нейтрона, испущенного источником.¹ Сферически симметричное поле изотропного источника увлекается им вдоль траектории движения. Кинематиче-

ский эффект обуславливает возникновение анизотропии поля в лабораторной (неподвижной) системе координат, выраженной в виде следа роя частиц.

Источники нейтронов, которыми являются все ядерные энергетические установки, являются изотропными со сплошным энергетическим спектром, перекрывающим интервал значимых скоростей на траекториях летательных аппаратов (ЛА) [1]. Можно ожидать, что в течение, по крайней мере, равной периоду полураспада нейтрона (~ 613.9 с) ЛА будет сопровождать «рой» из $10^8 \div 10^{12}$ частиц.

На рисунке 1 представлены среднеквадратическое отклонение скорости нейтронов и его отношение к среднему значению (коэффициент вариации) для изотропного источника, движущегося прямолинейно и равно-

¹ Айзерман М.А. Классическая механика : учебное пособие. – Москва: Наука, 1980. – 368 с.
– Режим доступа: <https://djvu.online/file/ueRjMhRf7oODt?ysclid=lxed4onu1h956444378>
(дата обращения: 02.04. 2024).

мерно в лабораторной системе координат со скоростью 1 км/с в функции отношения ско-

ростей нейтрон/источник.

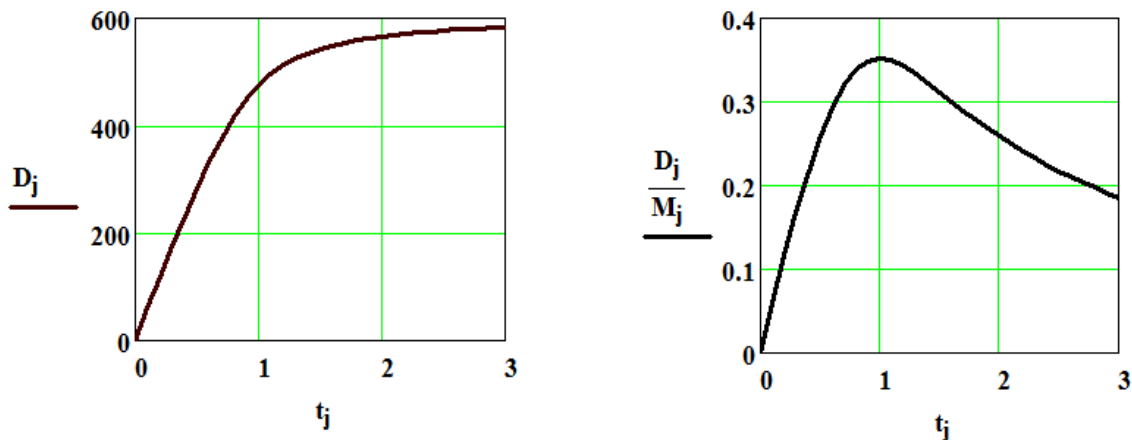


Рисунок 1. Среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации скорости нейтронов t_j – отношение скоростей нейтрон/источник [составлено авторами]

Figure 1. Standard deviation and coefficient of variation of neutron velocity t_j – neutron/source velocity ratio [compiled by the authors]

Эти графики являются демонстрацией классического принципа Галилея для изотропного источника, равномерно перемещающегося на плоскости при различных значениях отношений (скорость нейтрона/скорость источника) (км/с). Из рисунка 1 можно сделать вывод, что разброс значений скорости нейтронов наибольший при совпадении их со скоростью источника. Результаты получены прямой имитацией движения нейтронов методом Монте-Карло.

Следующий график продолжает иллюстрацию, визуализируя коридор скоростей вблизи среднего значения, шириной равной удвоенному среднеквадратическому значению. На рисунке 2 представлен коридор $(M_j \pm D_j)$ среднего значения скорости нейтронов в лабораторной системе координат для изотропного источника, движущегося прямолинейно и равномерно со скоростью 1 км/с в функции отношения скоростей нейтрон/источник.

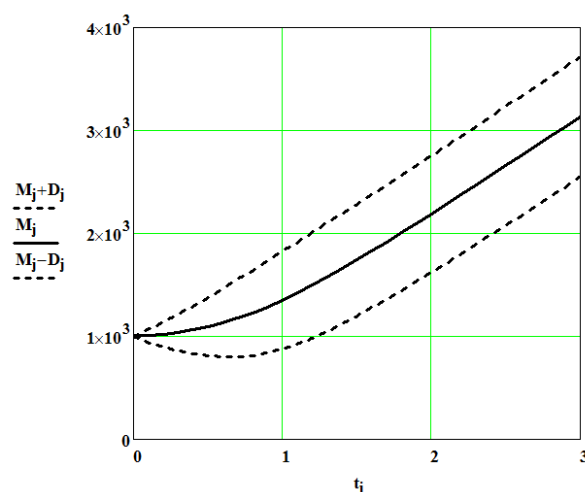


Рисунок 2. Коридор $(M_j \pm D_j)$ среднего значения скорости нейтронов в лабораторной системе координат для изотропного источника, движущегося прямолинейно и равномерно со скоростью 1 км/с в функции отношения скоростей нейтрон/источник [составлено авторами]

Figure 2. Corridor $(M_j \pm D_j)$ of the mean value of neutron velocity in the laboratory coordinate system for an isotropic source moving straight and uniformly at 1 km/s as a function of the neutron/source velocity ratio [compiled by the authors]

На рисунке 3 представлено сечение (X, Z) роя из 100 нейтронов через 613.9 с, после их излучения источником в начале координат (0,0), что характеризует возникновение зна-

чительной асимметрии в первоначально изотропном угловом распределении нейтронов при их скоростях совпадающих со скоростью источника.

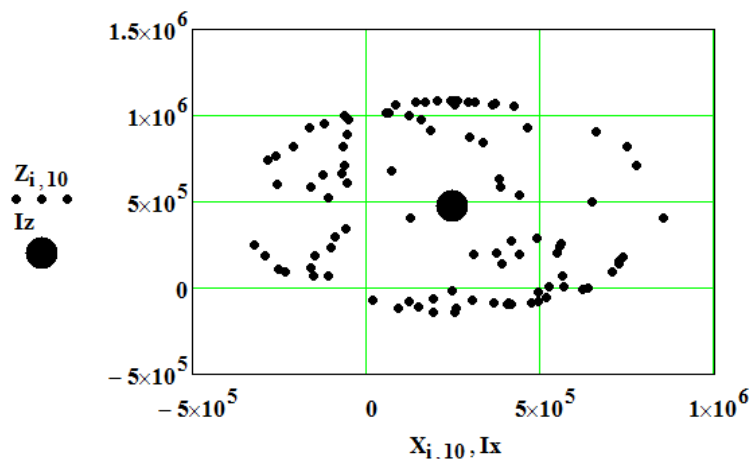


Рисунок 3. Сечение роя из 100 нейтронов через 613.9 с, после их излучения в начале координат (0,0).
Здесь (I_x, I_z) – положение источника в конце движения [составлено авторами]

Figure 3. Cross section of a swarm of 100 neutrons after 613.9 s, after their emission at the origin (0,0).
Here (I_x, I_z) is the position of the source at the end of the motion [compiled by the authors]

Представленный графический образ эволюции «облака» нейтронов демонстрирует сепарационный эффект классического принципа Галилея при прямолинейном равномерном движении точечного изотропного источника нейтронов на плоскости. Это позволяет сделать вывод об определяющей роли кинематического фактора (отношение скоростей нейтрон/источник) в формировании нейтронного поля. Данный результат, быть может, и является тривиальным, однако до сих пор не обсуждался специалистами [2].

Излучение источника, движущегося в центральном гравитационном поле

Гравитационные поля обладают основным свойством: все тела вне зависимости от их массы движутся в них (при заданных начальных условиях) одинаковым образом. В центральном гравитационном поле источник движется по кеплеровской орбите. Будем считать выделенной (по критерию радиационной опасности) область вблизи траектории источника. Индикатором опасности примем поток скорости нейтронов в этой области. Исходя из кинематического эффекта, увеличение значений этого индикатора, за счёт сепарации орбит, возможно для спек-

тров, в которых средняя скорость нейтронов близка скорости источника. Прототипом этой задачи отчасти служит направление в астрофизике, изучающее образование пылевых облаков при выбросе вещества с поверхности космических тел [3,4]. Несмотря на разную физику процессов, исследование облаков частиц в гравитационном поле, требует привлечение однотипных уравнений.

Пусть по эллиптической орбите вокруг земли движется спутник массой m_c – носитель изотропного источника нейтронов. В момент t_0 излучается импульс Q . Этот эпизод рассмотрим в неподвижной декартовой системе координат, связанной с землёй, рисунок 4. Ось x направим в точку нахождения спутника в момент излучения. Ось y направим ортогонально x в плоскости орбиты в сторону движения. Ось z направим по вектору площади орбиты спутника.

Скорость спутника в момент импульса равна (1):

$$v_0 = w \cdot (\sin f, \cos f, 0). \quad (1)$$

Здесь вектор скорости представлен в координатной форме. Модуль вектора скорости выражается через параметры орбиты

спутника (фокальный параметр и эксцентриситет) по формуле (2):

$$w = \frac{\kappa}{\sqrt{\rho_0}} K. \quad (2)$$

Здесь

$$K = \sqrt{1 + 2e_0 \cos \varphi_0 + e_0^2}; \quad 1 - e_0 \leq K \leq 1 + e_0,$$

где κ^2 – произведение постоянной тяготения

$$G = 6.6726 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{с}^{-2} / \text{кг}$$

$$\text{на массу земли}$$

$$M_3 = 5.977 \cdot 10^{24} \text{ кг};$$

φ – полярный угол (истинная аномалия)

отсчитывается от полярной оси против часовой стрелки. При $\varphi=0$ – перигей орбиты (П). В перигее вектор скорости перпендикулярен большой оси эллипса, радиальная составляющая скорости равна нулю, а модуль скорости имеет максимальное значение;

f – угол, на который надо повернуть вектор скорости v_0 до совмещения с лучом Oy' , параллельным лучу Oy .

По формулам кеплеровского движения выражаем связь между действующими углами φ_0 и f (3)² [4]:

$$\cos f = \frac{1 + e_0 \cos \varphi_0}{K}, \quad \sin f = \frac{e_0 \sin \varphi_0}{K}. \quad (3)$$

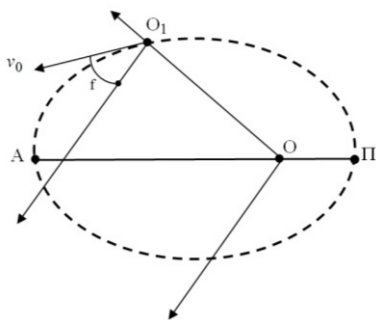


Рисунок 4. Модель излучения импульса на орбите изотропного источника нейтронов
[составлено авторами]

Figure 4. Model of pulse radiation in the orbit of an isotropic neutron source [compiled by the authors]

² Холшевников К.В., Титов В.Б. Задача двух тел: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2007. – 180 с. – Режим доступа: <https://vdocuments.mx/-57ade25e1a28abbe3a977d29.html> (дата обращения: 02.04.2024).

Все параметры орбиты спутника (p , e , a – большая полуось, b – малая полуось, T – период обращения) выражаются через расстояние r_{Π} = ОП и скорость v_{Π} в перигее.

Если изотропию излучения нейтронного источника описывать углами θ и λ на единичной сфере, $w_n(\theta, \lambda)$ – скорость нейтрона при вылете, то в неподвижной системе координат мгновенный вектор скорости нейтрона равен (4) [3]:

$$v_n = w \cdot (\sin f + c \sin \theta \cos \lambda, \cos f + c \sin \theta \sin \lambda, c \cos \theta) \quad (4)$$

Модуль скорости нейтрона (5):

$$|v_n| = wL, \quad L = \sqrt{1 + 2c \sin \theta \sin(f + \lambda) + c^2}, \quad 1 - c \leq L \leq 1 + c, \quad (5)$$

где $c(\theta, \lambda) = w_n(\theta, \lambda)/w$ – безразмерная скорость (параметр выброса).

Поток векторного поля v_n через площадку, нормаль n которой совпадает с направлением скорости спутника v_0 в некоторой точке траектории задаётся скалярным произведением этих векторов (6):

$$P = n v_n = w \cdot [\sin f \cdot (\sin f + c \sin \theta \cos \lambda) + \cos f \cdot (\cos f + c \sin \theta \sin \lambda) + \alpha \cdot c \cos \theta], \quad (6)$$

где α – корректирующий коэффициент (~ 0) для учета реального объёма источника нейтронов.^{3,4}

Исследуем изменение значений потока векторного поля скорости нейтронов в различных точках орбиты спутника $P(\varphi_0)$. Для этого воспользуемся имитационной моделью

³ Веретенников В.Г., Сеницын В. А. Теоретическая механика (дополнение к общим разделам) : учебное пособие. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 416 с. – Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/47551?category_pk=930&publisher_fk=0 (дата обращения: 02.04.2024).

⁴ Безменов В.М., Прокофьев Л.Н. Векторная алгебра : учебное пособие. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, 2001. – 60 с. – Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_000733580/?ysclid=lxee7hod8a492636066 (дата обращения: 02.04.2024).

движения гипотетической орбитальной станции.⁵

Параметры движения гипотетической орбитальной станции с $r_{\Pi} = 7.0 \times 10^3$ км; $v_{\Pi} = 9.0 \times 10^3$ м/с приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры орбиты гипотетической околоземной станции [составлено авторами]

Table 1. Orbit parameters of a hypothetical near-Earth station [compiled by the authors]

Параметр	Идентифицирующее уравнение	Числовое значение
p – фокальный параметр	$\rho = \frac{v_{\Pi}^2 \tau_{\Pi}^2}{GM_3}$	$9,95210^3$, км
e – эксцентриситет	$e = \frac{p}{\tau_{\Pi}} - 1$	0,422
a – большая полуось	$\alpha = \frac{p}{1 - e^2}$	$1,2110^4$, км
b – малая полуось	$b = \sqrt{\alpha p}$	$1,09810^4$, км
T – период обращения	$T = 2\pi\alpha b / (60\tau_{\Pi}v_{\Pi})$	220,823 мин

Источник нейтронов, находящийся на станции, непрерывно излучает, так что в некоторой области создаётся динамическое равновесие плотности нейтронов. Ожидаем, что гравитационное поле распределяет часть нейтронов по орбитам и удерживает их в потоке, поперечное сечение которого, перпендикулярно траектории станции.

Интервал скоростей, характерный для эллиптических орбит эквивалентен энергии нейтронов в абсолютной системе координат:

$E_n \approx (0.327 \div 0.657)$ эВ, следовательно, $v_{\text{отн}}$ предполагает группы,

$E_n \approx (0.005 \div 0.330)$ эВ, излучаемые в переднюю полусферу (по направлению движения) и $E_n \approx (0.005 \div 1.314)$ эВ в заднюю, относительно источника. По принятой классификации это соответствует энергии тепловых и надтепловых нейтронов. Доля таких нейтронов в спектре источника, может быть невелика. Она максимальна для ядерных ре-

акторов на тепловых нейтронах со спектром Максвелла.

Будем считать, что эффект накопления нейтронов следует ожидать для орбитальных станций, рассеивающих в окружающее пространство нейтроны со спектром значений энергии в интервале $E=(0.0 - 2.0)$ эВ [5]. Среднее время жизни нейтрона в свободном состоянии $\tau=885.7$ секунды, т.е. «пучок орбит» нейтронов может поддерживаться в некотором «торе» окружающем орбиту источника за счёт статистического равновесия процессов рождение – распад (7):

$$N(t) = N_0(t)e^{-t/\tau}. \quad (7)$$

Воспользуемся максвелловским распределением вида (8):

$$N(E) = \left(2/\sqrt{\pi\sigma^3}\right)\sqrt{E} \exp\left(-\frac{E}{\sigma}\right). \quad (8)$$

На интервале $E=(0.0 - 1.5)$ эВ. Максимум распределения достигается при $E_{\text{max}} = \frac{\sigma}{2}$ эВ. Здесь σ – варьируемый параметр, управляемый средней энергией спектра $\bar{E} = \frac{3}{2}\sigma$. Для $\bar{E}=0.45$ эВ. $\sigma=0.3$ эВ.

На рисунке 5 представлена форма кривой с данным параметром. Выборка из спектра строится на базе алгоритма Неймана [6]. Для каждого разыгранного значения энергии скорость частицы вычисляется по формуле:

$$v_n = \sqrt{\frac{2E}{m_n}} = 1.383210^4 \sqrt{E} \text{ м/с}. \quad (9)$$

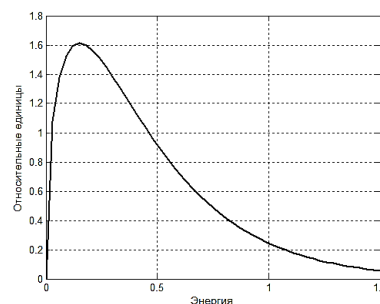


Рисунок 5. Спектр нейтронов на интервале (0–1.5) эВ, $\sigma=0.3$ [составлено авторами]

Figure 5. Neutron spectrum at the interval (0–1.5) eV, $\sigma=0.3$ [compiled by the authors]

⁵ Мирер С.А. Механика космического полёта. Орбитальное движение : учебно-методическое пособие. – Москва: Изд-во МФТИ, 2013. – Режим доступа: <https://keldysh.ru/kur/move.pdf> (дата обращения: 02.04.2024).

Разделим орбиту станции точками так, что две из них совпадают с перигеем и апогеем, а остальные равномерно распределены по орбите. В каждой точке источник излучает пакет из 1000 нейтронов. Такая модель даёт возможность поддерживать статистику на уровне имеющихся вычислительных ресурсов. Увеличение числа точек деления орбиты приближает модель к представлению непрерывного излучения.

Моделирование «нейтронного следа» источника заданного спектра в гравитационном поле включает: равномерное изотропное угловое распределение нейтронов в трёхмерном пространстве относительных скоростей; реализацию алгоритма Неймана; формирование матрицы плотности потока скорости в каждой точке деления траектории с учётом вклада излучения от предыдущей. Результаты исследования получим в виде матрицы $P=(P_{ij})$. Здесь индекс j – номер столбца соответствует номеру точки деления орбиты спутника, начиная с перигея, индекс i – номер строки соответствует номеру нейтрона в пакете. Матрицу P представим в виде двух матриц: $M^+ > 0$ – плотность потока скорости нейтронов в переднюю полусферу по направлению движения; $M^- < 0$ – плотность потока скорости нейтронов в заднюю полусферу по направлению движения. Объединение обеих матриц по вертикали даёт исходную матрицу P без нулевых строк. На каждой из этих матриц определим математическое ожидание в столбцах –

средняя плотность потока скоростей нейтронов в точке деления орбиты спутника (D, R) и значение определителя корреляционной матрицы $|Matrix_{9 \times 9}[corr(\cdot)]|$ – индикатор коллинеарности векторов скоростей нейтронов в потоке.

На рисунке 6 представлены плотности потоков скоростей нейтронов в переднюю D и заднюю R полусферы относительно движения источника по орбите как функция полярного угла $\varphi_0 = (0 \div 2\pi)$ (истинная аномалия – отсчитывается от полярной оси против часовой стрелки). При $\varphi_0 = 0$ – перигей орбиты (Π).

Вектора скоростей коллинеарны (9):

$$|Matrix_{9 \times 9}[corr(M^+)]| = |Matrix_{9 \times 9}[corr(M^-)]| = 0 \quad (10)$$

т.е. поток тепловых нейтронов образует устойчивый след при движении источника в гравитационном поле.

Имитационным расчётным путем показано, что вектора скоростей источника и нейтронов вблизи орбиты коллинеарны, то есть (также как при ламинарном движении), поток тепловых нейтронов образует устойчивый след при движении источника в гравитационном поле. Рисунок 6 демонстрирует гармоническую осцилляцию величины плотности потока скоростей, что соответствует движению источника по замкнутой орбите.

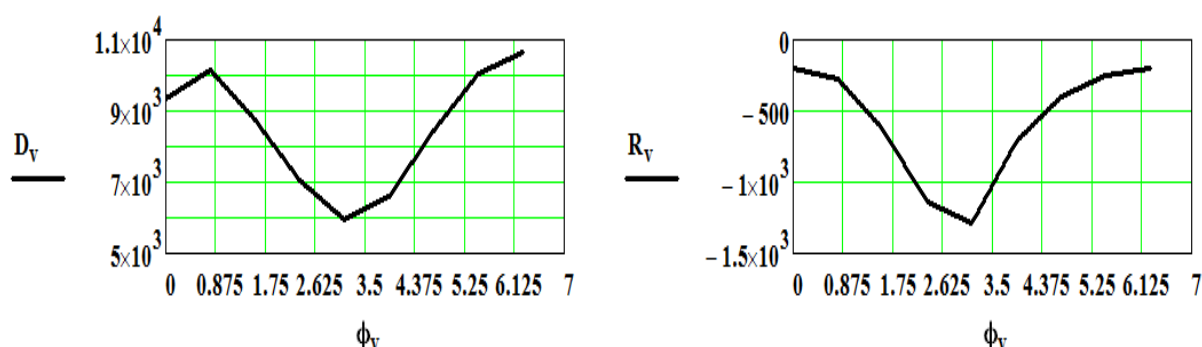


Рисунок 6. Плотности потоков скоростей нейтронов в переднюю D и заднюю R полусферы относительно движения источника по орбите как функция полярного угла $\varphi_0 = (0 \div 2\pi)$
[составлено авторами]

Figure 6. Neutron velocity flux densities to the front D and rear R hemispheres relative to the source orbital motion as a function of the polar angle $\varphi_0 = (0 \div 2\pi)$ [compiled by the authors]

Тренд увеличения абсолютных значений за период обращения свидетельствует о накоплении нейтронов в облаке.

Выводы

Рассмотрена гипотеза о возможности образования устойчивого нейтронного следа вокруг орбиты космического объекта, имеющего на борту ядерную энергетическую установку на тепловых нейтронах.

Гипотеза подтверждена на частном демонстрационном примере методом имитационного моделирования.

Результаты получены на основе фундаментальных соотношений современной астрофизики, являются совершенно уникальными. Обоснованность используемых моделей подтверждена опытом специалистов многих стран.

Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что впервые обращается внимание на существование особой компоненты радиационного риска, связанной с использованием РУ на тепловых нейтронах в качестве энергоисточников на космических аппаратах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Зродников А.В., Ионкин В.И. А.И. Лепунский и ядерные энергетические установки для космических исследований. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2003;4:19–27. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2003/04.pdf> (дата обращения: 07.05.2024).

Zrodnikov A.V., Ionkin V.I. A.I. Lepunsky and Nuclear Power Plants for Space Research. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2003;4:19–27. Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2003/04.pdf> (accessed: 07.05.2024).

2. Гинзбург В.Л. Излучение равномерно движущихся источников (эффект Вавилова – Черенкова, переходное излучение и некоторые другие явления). *Акустический журнал*. 2005;51(1):24–36. Режим доступа: http://www.akzh.ru/pdf/2005_1_24-36.pdf (дата обращения: 07.05.2024).

Ginzburg V.L. Radiation of uniformly moving sources (Vavilov-Cherenkov effect, transient radiation and some other phenomena). *Acoustical Journal*. 2005;51(1):24–36. Available at: http://www.akzh.ru/pdf/2005_1_24-36.pdf (accessed: 07.05.2024).

3. Орлов С.А., Холшевников К.В. Орбитальный пылевой тор как огибающая поверхность семейства траекторий изотропно выброшенных частиц. *Астрономический вестник*. 2008;42(2):99–118. Режим доступа: <https://naukarus.com/orbitalnyy-pylevoy-tor-kak-ogibayuschaya-poverhnost-semeystva-traektoriy-izotropno-vybrosennyh-chastits> (дата обращения: 07.05.2024).

Orlov S.A., Kholshchevnikov K. V. An orbital dust torus as an envelope surface of a family of trajectories of isotropically ejected particles. *Astronomical Bulletin*. 2008;42(2):99–118. Available at: <https://naukarus.com/orbitalnyy-pylevoy-tor-kak-ogibayuschaya-poverhnost-semeystva-traektoriy-izotropno-vybrosennyh-chastits> (accessed: 07.05.2024).

4. Холшевников К.В., Орлов С.А. О форме облака частиц, выброшенных с поверхности небесного тела. Материалы 46-й Международной студенческой научной конференции: Физика Космоса. Екатеринбург, 30 января – 3 февраля 2017 г. С. 148–168. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29103288> (дата обращения: 07.05.2024).

Kholshchevnikov K.V., Orlov S.A. On the shape of a cloud of particles ejected from the surface of a celestial body. Proceedings of the 46th International Student Scientific Conference: Space Physics. Yekaterinburg, January 30 – February 3, 2017. P. 148–168. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29103288> (accessed: 07.05.2024).

5. Кошелев А.С., Севастьянов В.Д. Аналитическое представление спектра нейтронов деления ^{235}U и ^{252}Cf . *Атомная энергия*. 2000;88(4):299–303. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t88-4_2000/p299/

Koshelev A.S., Sevastyanov V.D. Analytical representation of the fission neutron spectrum of ^{235}U and ^{252}Cf . *Atomic Energy*. 2000;88(4):299–303. Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t88-4_2000/p299/ (accessed: 07.05.2024).

6. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Т.2. Получисленные алгоритмы. Перевод с английского. Москва: Издательский дом Вильямс, 2001. 832 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/AK1GKM4qtVd6r?ysclid=lxee6mw6wx154860458> (дата обращения: 07.05.2024).

Knuth D.E. The art of programming. Vol.2. Semi-numerical algorithms. English translation. Moscow: Williams Publishing House, 2001. 832 p. Available at: <https://djvu.online/file/AK1GKM4qtVd6r?ysclid=lxefmw6wx154860458> (accessed: 07.05.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Шпицер В.Я. – подтверждение методом имитационного моделирования гипотезы о возможности образования устойчивого нейтронного следа вокруг орбиты космического объекта, имеющего на борту ядерную энергетическую установку на тепловых нейтронах. Написание текста статьи, подготовка и опубликованию результатов исследования.

Кривин В.В. – выполнение измерений, анализ экспериментальных данных, подбор литературных источников, редактирование текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования. Инициативное исследование.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Шпицер Владимир Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5051-5091>

e-mail: shpitser@mail.ru

Кривин Валерий Вольфович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0903-0786>

e-mail: VVKrivin@mephi.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Shpitser V.Y. – confirmation by simulation modeling of the hypothesis about the possibility of formation of a stable neutron trace around the orbit of a space object with a thermal neutron nuclear power plant on board. Writing the text of the article, preparation and publication of the research results.

Krivin V.V. – performance of measurements, analysis of experimental data, selection of literature sources, editing of the text of the article.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding. Initiative research.

CONFLICT OF INTEREST:

There is no conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vladimir Y. Shpitser, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department of Nuclear Power Engineering, Volgondsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgondsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5051-5091>

e-mail: shpitser@mail.ru

Valery V. Krivin, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department of Information and Control Systems, Volgondsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgondsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0903-0786>

e-mail: VVKrivin@mephi.ru

Поступила в редакцию 18.02.2024

После доработки 27.05.2024

Принята к публикации 04.06.2024

Received 18.02.2024

Received 27.05.2024

Accepted 04.06.2024