

ПОКАЗАТЕЛИ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ШУМОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ И РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Проведено исследование эффекта воздействия электромагнитного шумового излучения и радиопоглощающих композиционных материалов на основе полимеров с добавлением 1–10 вес. % углеродных нанотрубок на электроэнцефалограмму. Определены количественные (корреляционная размерность, энтропия Колмогорова) параметры электроэнцефалограмм при воздействии электромагнитного шумового излучения. Анализ электроэнцефалограмм, выполненный методом задержанной координаты, показал, что в них наблюдаются различные структурные изменения при воздействии шумовых сигналов и размещении защитных экранов. Полученные количественные параметры свидетельствуют об увеличении активности центральной нервной системы при вариациях спектральной плотности мощности бета- и тета-ритмов под действием электромагнитного излучения и радиопоглощающих материалов на основе полимеров с добавлением углеродных нанотрубок.

Ключевые слова: электроэнцефалограмма; шум; генератор; хаотическая динамика; излучения; радиопоглощающий; композиционный; материал.

The effects exerted by the electromagnetic noise radiation and by the radioabsorbing materials produced on the basis of polymers and 1–10 wt. % carbonic nanotubes on human electroencephalograms are studied. The electroencephalograms are analyzed using the delayed coordinate method.

The quantitative (correlation dimension and Kolmogorov entropy) parameters of encephalograms subjected to the electromagnetic noise radiation are determined. The performed analysis of electroencephalograms shows that their structural changes are different for signals under the effect of noise and with the use of protection screens between the noise generator and wide-band antenna.

The obtained quantitative parameters provide information about the central nervous system activity increasing with the spectral power density of beta- and tetra-rhythms due to the electromagnetic radiation of noise generators and with the use of radioabsorbing materials.

Key words: electroencephalogram; noise; oscillator; chaotic; dynamics; radiation; radio absorbing; composition; material.

Современные информационные технологии находят все более широкое применение в различных сферах человеческой деятельности. Насущной задачей является разработка и внедрение методов и средств защиты информации для обеспечения ее целостности, полноты и доступности, а также конфиденциальности.

Технические средства защиты информации препятствуют ее несанкционированному приему по электромагнитным излучениям и наводкам в линиях электропитания. Реализация активных и пассивных методов защиты информации осуществляется путем использования экранов из радиопоглощающих материалов [1], изготовленных с использованием нанотехнологий. Получают развитие технологии изготовления различных композитов на основе полимеров с добавлением 1–10 вес. % углеродных нанотрубок [2, 3]. Такие материалы могут быть применены в качестве защитного покрытия для экранирования уникальных электронных систем [3], в том числе и на космических аппаратах. При использовании радиопоглощающих материалов актуальными являются вопросы обеспечения экологической составляющей воздействия электромагнитных шумовых излучений на оператора и прежде всего на деятельность его центральной нервной системы.

В научной литературе имеются данные, хотя и противоречивые, о влиянии электромагнитных излучений, в частности излучений мобильной связи, на организм человека [4–6]. Оценка же воздействия электромагнитных излучений генераторов шума на организм человека или отдельные его системы в доступной литературе практически отсутствует.

Цель настоящей работы – исследование и анализ методами хаотической динамики электроэнцефалограмм здоровых лиц для получения информативных показателей, характеризующих вариации состояния центральной нервной системы при действии шумовых электромагнитных излучений и применении радиопоглощающих материалов на основе полимеров с добавлением углеродных нанотрубок.

Методика проведения исследований

Для обработки и анализа электроэнцефалографических сигналов традиционно используются статистические и спектральные методы. Получаемая при этом информация не всегда позволяет оценить динамику функционирования мозга (особенно при быстроизменяющихся факторах воздействия со стороны окружающей среды) либо идентифицировать состояние центральной нервной системы на основе анализа его биоэлектрической активности. Для изучения биоэлектрической активности мозга при действии излучений мобильной связи [7–9], а также для некоторых видов патологии [10] успешно используется, в том числе и нами, методология исследований, в основу которой положено представление о биоэлектрических сигналах, отображающих деятельность мозга с позиции хаотической динамики.

При исследовании электроэнцефалограмм нами применен метод задержанной координаты, посредством которого определяются корреляционная размерность и энтропия Колмогорова. Корреляционная размерность позволяет установить область локализации динамической системы в фазовом пространстве или ее число степеней свободы. Выражение для расчета корреляционной размерности имеет вид

$$d = \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{\lg C_m(l)}{\lg r} \right],$$

где $C_m(l)$, корреляционный интеграл, – это функция, равная вероятности того, что расстояние между двумя реконструированными векторами \vec{x}_i меньше заданного минимального значения l ; r – размер ячейки разбиения или коэффициент подобия.

Энтропия Колмогорова E характеризует устойчивость работы динамической системы. Она оценивается согласно выражению

$$E = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \lg \left[\frac{C_m(l)}{C_{m+1}(l)} \right],$$

где τ – время выборки.

Для динамических систем, которые находят из экспериментальных временных реализаций, энтропию Колмогорова целесообразно определять в нормированном по энергии виде [11].

Исследование и анализ зарегистрированных в клинических условиях электроэнцефалограмм здоровых лиц проводились при действии электромагнитных шумовых излучений от генератора шума (ген.) на полупроводниковых транзисторах [12] в комбинации с экранами из радиопоглощающих (погл.) материалов: погл. 1 и погл. 2. Регистрация электроэнцефалограмм осуществлялась электроэнцефалографом «Нейрокартограф» фирмы «МБН». Исследовались электроэнцефалограммы 12 здоровых лиц в шестнадцати отведениях в соответствии с международной схемой «10–20». Обработка и анализ электроэнцефалограмм проводились в разработанной нами информационно-измерительной системе, адаптированной для работы с электроэнцефалограммами [11] в следующих режимах: фон (режим 1); ген. 1, погл. 1 (режим 2); ген. 1, погл. 2 (режим 3).

В работе применялся генератор шума на полупроводниковых транзисторах с диапазоном рабочих частот от 0,01 до 2000 МГц и спектральной плотностью мощности шума, составляющей не менее 35 дБм.

В качестве радиопоглощающих материалов в работе использовались полиуретановые композиты АДВ-22 с добавлениями 0,058 вес. % таунита (погл. 1) и 0,4 вес. % таунита (погл. 2). Коэффициент ослабления излучения в диапазоне 0,6–2 ГГц составляет 20 дБ (погрешность измерения – около 1 дБ), коэффициент стоячей волны (КСВ) равен 1,5. В диапазоне частот 8–12 ГГц коэффициент ослабления и КСВ равны 30 и 2,8 дБ соответственно. Образцы изготовлены в лаборатории элионики научно-исследовательского учреждения «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ».

Функциональное состояние центральной нервной системы определяли в указанных выше режимах. Показатели хаотической динамики получали, применяя метод задержанной координаты, который позволяет учесть нелинейности, свойственные исследуемому сигналу. В процессе обработки электроэнцефалограмм с помощью разработанного программного обеспечения при использовании метода задержанной координаты и спектрального корреляционного метода определяли корреляционную размерность, энтропию Колмогорова, спектр мощности, спектральную плотность мощности в частотных интервалах ритмических составляющих мозга – альфа-, бета-, тета-диапазонах. Достоверность определения параметров проверялась методом дискриминационной статистики.

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе исследований проводился анализ электроэнцефалограмм отведений Fp1-A1, Fp2-A2, P3-A1, P4-A2, T3-A1, T4-A2.

Действие электромагнитных шумовых излучений генератора при наличии экрана погл. 1, а также излучений и экрана погл. 2 приводит к изменениям в функционировании головного мозга, которые проявляются в вариациях параметров электроэнцефалограмм. Для исследуемых электроэнцефалограмм в данной работе были построены гистограммы распределений параметров методом задержанной координаты: корреляционной размерности d и энтропии Колмогорова E для отведений T3-A1, T4-A2 (рис. 1) по отношению к фону.

Как видно из рис. 1, а, б, при действии электромагнитных шумовых излучений и экранов из радиопоглощающих материалов значение корреляционной размерности в электроэнцефалограммах T3-A1 и T4-A2 по отношению к фону снижается. При этом снижение составляет 5,2 и 2,1 % в отведениях T3-A1 и T4-A2 по отношению к фону при наличии излучения генератора и экрана погл. 1. Значительно меньшие изменения наблюдаются в отведениях электроэнцефалограмм T3-A1 и T4-A2 в случае шумового излучения и экрана погл. 2. Они составляют соответственно 2,1 и 1,3 % по отношению к фону.

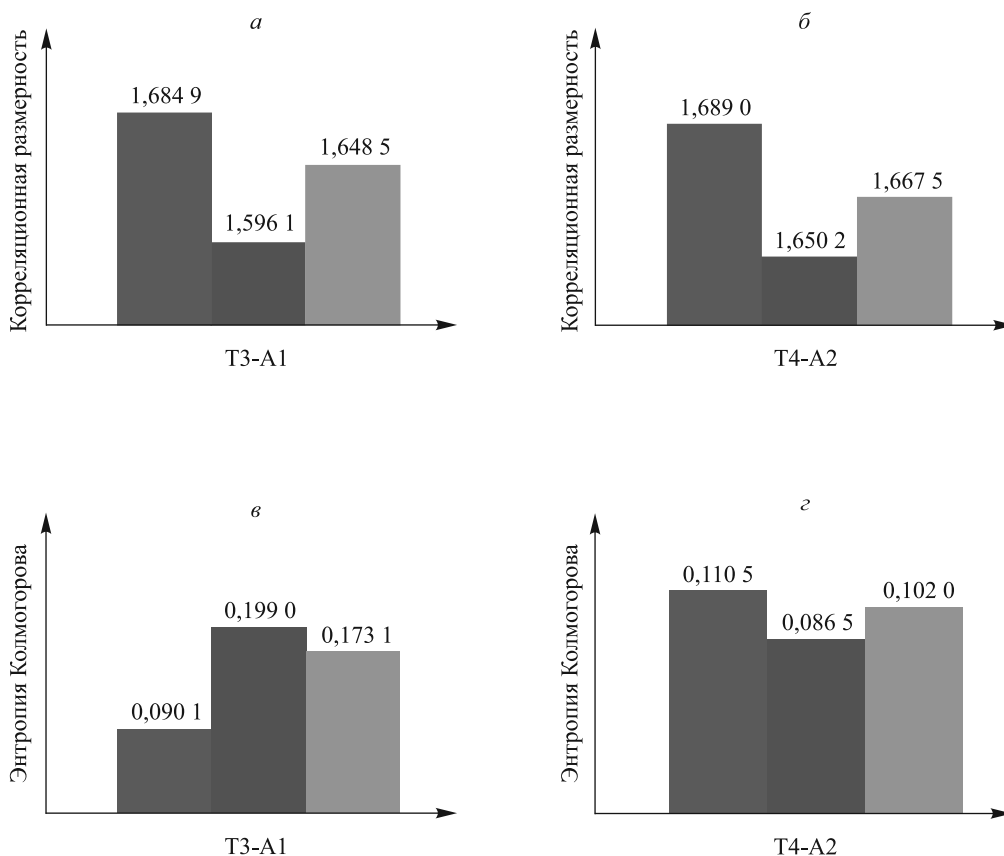


Рис. 1. Гистограммы распределений корреляционной размерности (а), (б), энтропии Колмогорова (в), (г) электроэнцефалограмм отведений Т3-А1 и Т4-А2 здоровых лиц: в фоне (режим 1); ген. 1, погл. 1 (режим 2); ген. 1, погл. 2 (режим 3).
Здесь и далее: ■ – фон; ■ – ген. 1, погл. 1; ■ – ген. 1, погл. 2

Что касается энтропии Колмогорова, то ее значения под влиянием шумового излучения и экрана погл. 1 возрастают более чем в два раза для электроэнцефалограммы отведения Т3-А1 (220 % – см. рис. 1, в) и снижаются для отведения Т4-А2 (92,1 % – см. рис. 1, г) относительно фона. При наличии излучения и экрана погл. 2 значение энтропии возрастает на 190 % для отведения Т3-А1 и снижается на 7,7 % для электроэнцефалограммы Т4-А2. Снижение энтропии свидетельствует о большей стабильности динамической системы, т. е. для экрана погл. 2 отмечается улучшение показателя энтропии Колмогорова по сравнению с экраном погл. 1.

В процессе исследований изучались также параметры спектрального корреляционного анализа электроэнцефалограмм при действии тех же факторов. Влияние электромагнитного шумового излучения обуславливает изменения ритмов головного мозга. Спектральная плотность мощности альфа-ритма в электроэнцефалограммах отведений Т3-А1 и Т4-А2 возрастает на 13,7 и 28,1 % соответственно в случае шумового излучения и экрана погл. 1 (рис. 2, а).

При наличии электромагнитного шума и экрана погл. 2 для отведения Т3-А1 отмечается увеличение спектральной плотности альфа-ритма на 11,7 %, а для отведения Т4-А2 его уровень практически остается равным значению для фона (см. рис. 2, б). Для шумового излучения и экрана погл. 1 при этом происходит возрастание спектральной плотности мощности бета-ритма в электроэнцефалограммах Т3-А1 фактически в два раза и в Т4-А2 – на 33,7 % относительно фона (см. рис. 2, в). В случае шумового излучения и экрана погл. 2 бета-ритм увеличивается на 34,2 и 14,8 % для указанных выше отведений (см. рис. 2, г) относительно фона.

Спектральная плотность мощности тета-ритма возрастает на 12,1 и 4,2 % для отведений Т3-А1 и Т4-А2 соответственно при действии шумовых излучений и экрана погл. 1 (см. рис. 2, д). Для электроэнцефалограмм отведений Т3-А1 и Т4-А2 при наличии шумовых излучений и экрана погл. 2 происходит увеличение тета-ритма на 12,1 % и снижение на 22,9 % (см. рис. 2, е), что подтверждает смещение активности процессов в мозге в сторону низких частот в отведении Т4-А2.

Известно, что увеличение мощности медленных ритмов дельта- и тета-диапазонов в сочетании с усилением высокочастотной активности бета-диапазона обычно является следствием развития

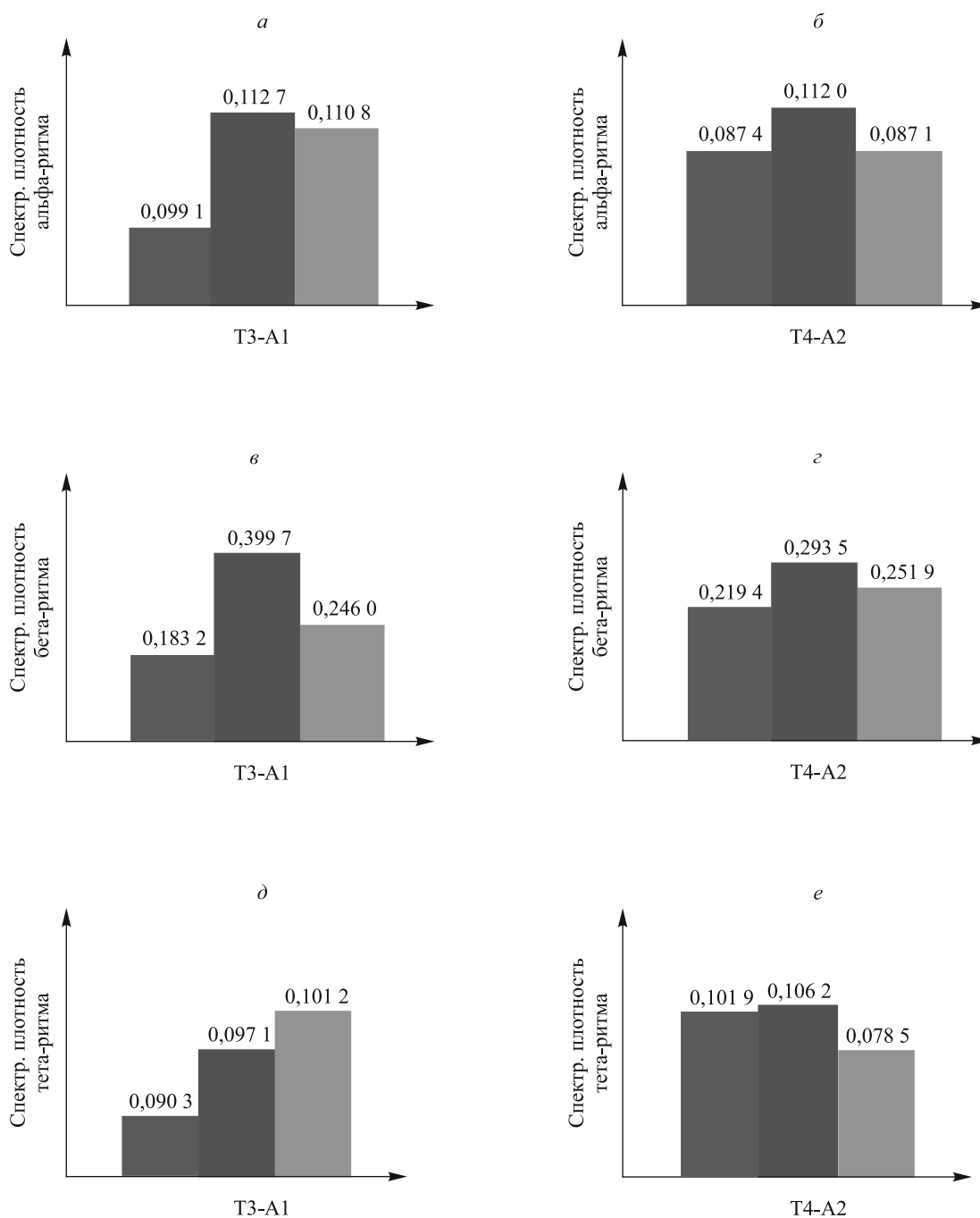


Рис. 2. Гистограммы распределений спектральной плотности мощности альфа-ритма (а), (б); бета-ритма (в), (г); тета-ритма (д), (е) электроэнцефалограмм отведений Т3-А1 и Т4-А2 здоровых лиц: в фоне (режим 1); ген. 1, погл. 1 (режим 2); ген. 1, погл. 2 (режим 3)

напряженной по сравнению с состоянием покоя деятельности. При этом изменения мощности альфа-ритма имеют также тенденцию к увеличению.

Анализ параметров электроэнцефалограмм здоровых лиц, проведенный методом задержанной координаты, а также спектральным корреляционным методом при действии электромагнитных шумовых излучений и экранов из радиопоглощающих материалов с добавлением углеродных нанотрубок двух типов – погл. 1 и погл. 2, – позволяет отдать предпочтение экрану 2. Структурный состав экрана 2 с добавлением углеродных нанотрубок отличался содержанием таунита в размере 0,4 вес. %. В составе экрана 1 находилось 0,058 вес. % таунита.

Выполненные исследования и анализ полученных результатов позволили сделать следующие выводы.

- При воздействии электромагнитных шумовых излучений и экранов из радиопоглощающего материала с добавлением нанотрубок выявлены структурные особенности электроэнцефалограмм и определены их количественные показатели у здоровых лиц.

- Информативными и характеризующими изменение состояния центральной нервной системы при действии электромагнитных шумовых излучений и экранов с добавлением нанотрубок являются показатели хаотической динамики: корреляционная размерность и энтропия Колмогорова, что подтверждается результатами приведенных экспериментальных исследований.
- Показатели хаотической динамики электроэнцефалограмм изменяются в зависимости от процентного содержания таунита при использовании в качестве экранов полиуретановых композитов.
- Спектральный корреляционный анализ исследуемых электроэнцефалограмм различных отведений по уровням спектральной плотности мощности альфа-, бета-, тета-ритмов позволил установить корреляции с распространением реакций, связанных с повышением возбудимости нервных структур головного мозга при действии шумовых излучений и экранов из радиопоглощающих материалов с добавлением нанотрубок.
- Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета влияния электромагнитных шумовых излучений и радиопоглощающих экранов на оператора при решении задач экологической безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hornbostel B.* Synthesis of carbon nanostructures // *Physica E.* 2008. Vol. 40. P. 2425–2429.
2. Влияние излучений мобильного телефона на биоэлектрическую активность мозга при использовании защитных экранов : тр. VI съезда по радиационным исследованиям (Москва, 25–28 окт. 2010 г.) / А. В. Сидоренко [и др.]. М., 2010. С. 184.
3. *Ткачев А. Г., Золотухин И. В.* Аппаратура и методы синтеза углеродных наноструктур. М., 2007.
4. *Salford Leif G., Brun A. E., Jacob L.* Nerve Cell Damage in Mammalian Brain after Exposure to Microwaves from GSM Mobile Phones // *Environmental Health Perspectives.* 2003. Vol. III, № 7. P. 881–883.
5. *Salford Leif G., Nittby H., Brun A.* The Mammalian Brain in the Electromagnetic Fields Designed by Man with Special Reference to Blood Brain Barrier Function. Neuronal Damage and Possible Physical Mechanisms // *Progress of Theoretical Physics Supplement.* 2008. Vol. 173. P. 283–309.
6. *Schüz J., Jacobsen R., Olsen J. H.* Cellular Telephone Use and Cancer Risk: Update of a Nationwide Danish Cohort // *J. of the National Cancer Institute.* 2006. Vol. 98, № 23. P. 1707–1713.
7. Анализ электроэнцефалограмм на основе динамического хаоса при действии излучений мобильного телефона и защитных экранов / А. В. Сидоренко [и др.] // *Вестн НАН Беларуси. Сер. мед. наук.* 2010. № 4. С. 57–65.
8. *Бецкий О. В., Лебедева Н. Н.* Синергетика и электромагнитные волны // *Миллиметровые волны в биологии и медицине.* 2004. № 4. С. 5–9.
9. Исследование потенциалов мозга спящего человека в условиях воздействия на него электромагнитного поля мобильного телефона / Н. Н. Лебедева [и др.] // *Биомедицинская радиоэлектроника.* 1999. № 7. С. 15–24.
10. *Sidorenko A. V., Ovsynkina G. I., Solonovich N. F.* Complex analysis of human electroencephalograms with circulatory disturbances of the brain // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems.* 2006. Vol. 9, № 1. P. 97–104.
11. *Сидоренко А. В.* Методы информационного анализа биоэлектрических сигналов. Минск, 2003.
12. *Жалковский М. В., Сидоренко А. В.* Мобильный генератор электромагнитного шума с питанием от порта USB // *Электроника инфо.* 2013. № 6. С. 35–36.

Поступила в редакцию 27.02.2015.

Алевтина Васильевна Сидоренко – доктор технических наук, профессор кафедры физики и аэрокосмических технологий факультета радиофизики и компьютерных технологий БГУ.

УДК 531

И. И. ЖОЛНЕРЕВИЧ

ОПЫТ ФУКО. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ МАЯТНИКА

Опыт Фуко заключается в наблюдении колебаний массивного шара, подвешенного на длинном тросе. Плоскость качаний маятника относительно Земли в Северном полушарии медленно поворачивается вокруг местной вертикали, причем в том же направлении, в каком совершается суточное вращение Солнца. В цитируемых курсах теоретической механики приведено общее решение уравнения движения маятника и проведен краткий анализ полученного решения. В курсах общей физики эта тема изучается на качественном уровне. Предложен другой, нежели в цитируемых курсах, метод решения уравнений движения маятника в приближении малых колебаний. Выполнен подробный анализ траекторий в зависимости от начальных условий, обычно реализуемых в экспериментах.

Ключевые слова: Фуко; опыт; маятник.

Foucault's experiment is performed to observe the oscillations of a massive ball suspended by a long rope. The oscillation plane of the pendulum relative to the Earth in the northern hemisphere is rotated about the local vertical and, moreover, in the direction associated with daily rotation of the Sun. The cited courses of theoretical mechanics provide a general solution to the equation of motion for the pendulum and the obtained solution is briefly analyzed. In the general physics courses this subject is studied on a qualitative level. This article suggests an alternative method of solving the equations of motion for the pendulum in the approximation of small oscillations. A detail analysis of the trajectories is conducted depending on the initial conditions usually implemented during the experiments.

Key words: Foucault; experiment; pendulum.