

Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 1. С. 178–182. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2023. Vol. 21. No. 1. P. 178–182. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 537.8

doi: 10.17122/ngdelo-2023-1-178-182

ИЗУЧЕНИЕ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕГО ЗАРЯДА В ДИПОЛЬНО-КВАДРУПОЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Николай Сергеевич Шулаев¹, Галина Федоровна Ефимова¹,
Аташ Зияддин оглы Абдуллаев¹

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Институт химических технологий и инжиниринга в г. Стерлитамаке, Стерлитамак, Россия

Автор, ответственный за переписку

Николай Сергеевич Шулаев, nshulayev@rambler.ru

Аннотация. Получено решение задачи по определению величины составляющей вектора напряженности электрического поля, генерируемого осциллирующим зарядом в дипольно-квадрупольной системе в однородной среде. Рассмотрены два взаимно перпендикулярных направления колебаний заряда в цилиндрической системе координат. Из анализа полученных зависимостей для частот колебаний видно, что в первом случае частота «вертикальных» колебаний превышает частоту «горизонтальных» колебаний. Зная максимальную и минимальную частоты спектра излучения осциллирующего заряда, можно вычислить молекулярные параметры. Анализ параметров спектра излучения гармонически осциллирующего заряда, совершающего нерелятивистское движение, может использоваться при анализе спектров электромагнитного излучения атомов и молекул, находящихся в возбужденном состоянии, а также параметров кристаллической решетки.

Для цитирования

Шулаев Н.С., Ефимова Г.Ф., Абдуллаев А.З. Изучение осциллирующего заряда в дипольно-квадрупольной системе // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 1. С. 178–182. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-1-178-182>.

Ключевые слова

осциллирующий заряд,
частота колебаний,
электромагнитное излучение,
гармонические колебания,
дипольно-квадрупольная система,
мощность излучения

Original article

STUDY OF AN OSCILLATING CHARGE IN A DIPOLE-QUADRUPOLE SYSTEM

Nikolay S. Shulaev¹, Galina F. Efimova¹, Atash Z. Abdullaev¹

¹Ufa state petroleum technological university
Chemical technologies and engineering institute, Sterlitamak, Russia

Corresponding author

Nikolay S. Shulaev, nshulayev@rambler.ru

Abstract. The solution of the problem of determining the magnitude of the component of the electric field intensity vector generated by an oscillating charge in a dipole-quadrupole system in a homogeneous medium is obtained. Two mutually perpendicular directions of charge oscillations in a cylindrical coordinate system are considered. From the analysis of the obtained dependences for the oscillation frequencies, it can be seen that in the first case, the frequency of «vertical» oscillations exceeds the frequency of «horizontal» oscillations. Knowing the maximum and mini-

Keywords

oscillating charge, oscillation
frequency, electromagnetic
radiation, harmonic oscillations,
dipole-quadrupole system,
radiation power

© Шулаев Н.С., Ефимова Г.Ф., Абдуллаев А.З., 2023

imum frequencies of the oscillating charge radiation spectrum, it is possible to calculate the molecular parameters. The analysis of the parameters of the radiation spectrum of a harmonically oscillating charge performing a non-relativistic motion can be used in the analysis of the electromagnetic radiation spectra of atoms and molecules in an excited state, as well as the parameters of the crystal lattice.

For citation

Shulaev N.S., Efimova G.F., Abdullaev A.Z. Izuchenie oscilliruyushchego zaryada v dipol'no-kvadrupol'noj sisteme [Study of an oscillating charge in a dipole-quadrupole system]// *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2023, Vol. 21, No. 1. pp. 178-182. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-1-178-182>.

Введение

Исследование параметров электромагнитного излучения (частоты колебаний, направлений векторов напряженности электрического поля $\vec{E}$ и индукции магнитного поля $\vec{B}$) осциллирующим зарядом является актуальным, так как позволяет, в частности, определять параметры расположения зарядов в молекулах, кристаллических решетках [1–5].

Рассмотрим систему из семи зарядов: отрицательные заряды $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q_-$ находятся в вершинах прямоугольника со сторонами $2a$ и $2b$, положительные заряды $Q_5 = Q_6 = Q_+$ находятся в центре сторон $2b$ прямоугольника, осциллирующий отрицательный заряд q находится в центре прямоугольника (рисунок 1).

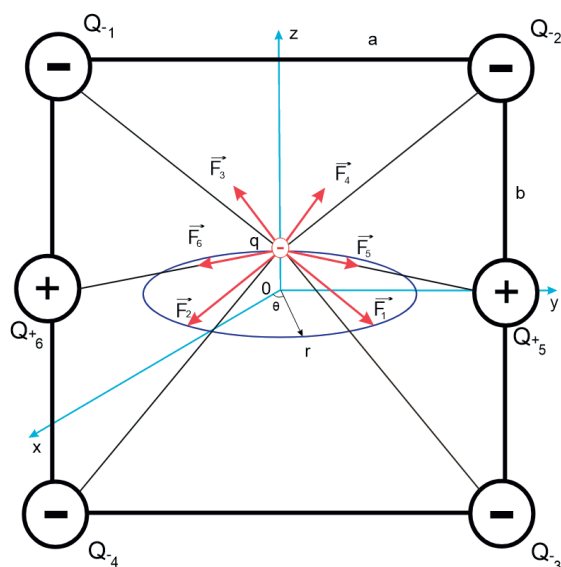


Рисунок 1. Схема расположения зарядов и сил взаимодействия при вертикальных осцилляциях

Figure 1. Arrangement of charges and interaction forces in vertical oscillations

Рассмотрим два случая: 1 — колебания заряда по прямой, параллельной сторонам $2b$ прямоугольника (рисунок 1); 2 — по прямой, параллельной сторонам $2a$ (рисунок 2).

Уравнение движения заряда и в первом и втором случаях имеет вид [6] (1):

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \left(\sum_{i=1}^6 \vec{F}_i \right)_z, \quad (1)$$

где m — масса заряда q , $(\vec{F}_i)_z$ — z проекция силы, действующей со стороны заряда Q_i на заряд q . В первом случае ось z цилиндрической системы координат параллельна сторонам $2b$, во втором — $2a$ прямоугольника. Силы взаимодействия между зарядами определяются по формуле [7] (2):

$$F_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_i q}{r_i^2}, \quad (2)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная, r_i — расстояние между i -зарядом и зарядом q с учетом его смещения $z \ll a, b$. С учетом малости параметров $z/a, z/b \ll 1$ уравнение движения заряда q параллельно сторонам $2b$ (рисунок 1) примет вид (3):

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{2q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{4Q_- b^2}{d^5} + \frac{Q_+}{a^3} \right] z, \quad (3)$$

где $d^2 = a^2 + b^2$.

Уравнение (3) — это уравнение гармонических колебаний вида $\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \omega^2 z = 0$, решение которого можно представить в виде [8]:

$$z(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t$$

или

$$z(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Из уравнения (3) следует, что частота колебаний заряда q определится соотношением (4);

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{2q}{4\pi\epsilon_0 m} \left[\frac{4Q_- b^2}{d^5} + \frac{Q_+}{a^3} \right]}, \quad (4)$$

из которого следует, что частота осцилляций заряда q определяется величиной зарядов Q_- и Q_+ и геометрическими параметрами расположения зарядов.

Во втором случае, когда осцилляции заряда q происходят по оси z , параллельной сторонам $2a$ (рисунок 2), уравнение движения и частота колебаний имеют вид (5–6):

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{4q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2Q_- a^2}{d^5} - \frac{Q_+}{a^3} \right] z, \quad (5)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{4q}{4\pi\epsilon_0 m} \left[\frac{2Q_- a^2}{d^5} - \frac{Q_+}{a^3} \right]}. \quad (6)$$

Из последнего соотношения следует, что колебания заряда q будут устойчивы, если (7):

$$\frac{2Q_- a^2}{d^5} > \frac{Q_+}{a^3}. \quad (7)$$

Из формулы (7) очевидно, что для устойчивых колебаний соотношение между величиной зарядов Q_- и Q_+ , определяемое параметрами расположения зарядов, имеет вид (8):

$$\frac{Q_-}{Q_+} > \frac{1}{2} \left(\frac{d}{a} \right)^5. \quad (8)$$

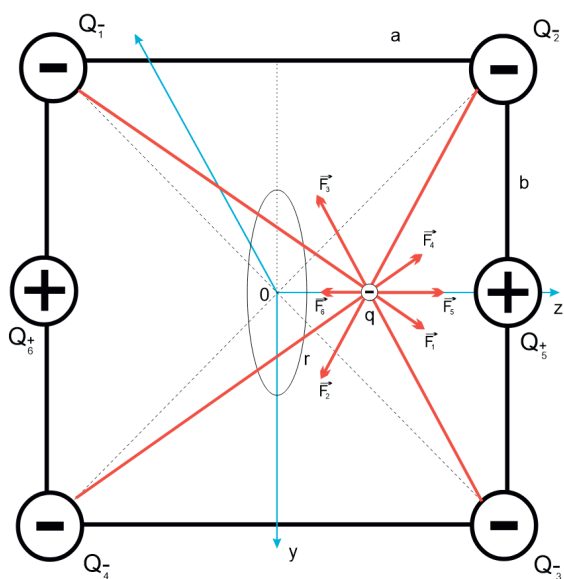


Рисунок 2. Схема расположения зарядов и сил взаимодействия при горизонтальных осцилляциях

Figure 2. Diagram of the arrangement of charges and interaction forces in horizontal oscillations

Из сравнения частот колебаний (4) и (6) видно, что в первом случае частота колебаний (ось z параллельна сторонам $2b$) превышает частоту «горизонтальных» колебаний (ось z параллельна сторонам $2a$). Зная максимальную и минимальную частоты спектра излучения осциллирующего заряда q можно вычислить молекулярные параметры a и b . Колебания заряда q генерируют электрический ток, значение которого в плоскости $z = 0$ имеет вид (9):

$$I_{1,2} = \frac{1}{2} q \omega_{1,2} \sin(\omega_{1,2} t). \quad (9)$$

Учитывая направление электрического тока (вдоль вертикального и горизонтального

положения оси z цилиндрической системы координат), из уравнения Максвелла [10] (10):

$$(\text{rot } \vec{B})_z = \mu \mu_0 j_z + \left(\mu \mu_0 \frac{d\vec{D}}{dt} \right)_z \quad (10)$$

следует, что в плоскости $z = 0$ при условии $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial}{\partial z} = 0$ электромагнитное излучение имеет составляющую вектора магнитной индукции B_θ , равную

$$B_\theta = B_{\theta 0} e^{-i(\omega_{1,2} t - k_r r)}, \quad (11)$$

где j_z — плотность тока, генерируемая осциллирующим зарядом; $\vec{D}$ — вектор электрической индукции, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; $\mu = 1$ — относительная магнитная проницаемость; $k_r = \frac{2\pi}{\lambda_{1,2}} - r$ — составляющая волнового вектора; $\lambda_{1,2}$ — длина волны излучения.

Из уравнения Максвелла (электромагнитная индукция) (12):

$$(\text{rot } \vec{E})_\theta = -\frac{\partial B_\theta}{\partial t} \quad (12)$$

можно определить E_z — составляющую электромагнитного излучения распространяющегося в радиальном направлении (13):

$$E_z = \int \frac{\partial B_\theta}{\partial t} dr = -\frac{\omega}{k_\lambda} B_{\theta 0} e^{-i(\omega t - k_r r)}. \quad (13)$$

Таким образом, при осцилляции заряда в дипольно-квадрупольной системе генерируется спектр излучений, в котором максимальная частота — ω_1 , а минимальная — ω_2 .

Анализ спектра излучений позволяет определить геометрические параметры расположения зарядов дипольно-квадрупольной системы, в частности, параметры кристаллической решетки [9, 11].

Выводы

Из приведенного анализа излучения осциллирующего заряда следует, что генерируется широкий спектр электромагнитных волн различной поляризации. Определяя спектр частот и отношение максимальной частоты к минимальной, можно определять параметры расположения зарядов, а также геометрические параметры кристаллической решетки.

Полученные результаты исследования могут быть использованы в прикладных физико-химических исследованиях, в частности, в спектроскопии, а также при изложении курсов физики и химии в технических университетах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гинзбург В.Л. Излучение равномерно движущихся источников (Эффект Вавилова-Черенкова, Переходное излучение и некоторые другие явления) // Акустический журнал. 2005. Т. 51, № 1. С. 24-36.

2. Зельдович Я.Б. Взаимодействие свободных электронов с электромагнитным излучением // Успехи физических наук. 1975. Т. 115, Вып. 2. С. 161-197.

3. Dirac P.A.M. Fundamental Equations of Quantum Mechanics // Proc. Roy. Soc. Lond. A. 1925. Vol. 109. P. 642-653.

4. Водянов Н.Г. Релятивистская модель осциллирующего электрона в физической системе электрон-вакуум // Вестник Чувашского университета. 2007. № 2. С. 12-20.

5. Шулаев Н.С., Ефимова Г.Ф. Абдуллаев А.З. Излучение осциллирующего заряда в квадрупольной системе // Естественные и технические науки. 2022. № 6 (169). С. 19-22.

6. Ткаченко В.И., Ткаченко И.В. Излучение осциллирующего заряда, движущегося с нерелятивистской скоростью в периодически неоднородной среде // Вопросы атомной науки и техники. 2008. № 4. С. 242-244.

7. McNally J.R. Preliminary Report on the Ball Lightning // Materials of 2 Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society. Gatlinburg, USA. 1960. Paper J-15. P. 1-25.

8. Григорьев А.И., Колбнева Н.Ю., Ширяева С.О. Излучение электромагнитных волн осциллирующей сильно заряженной каплей // Журнал технической физики. 2016. Т. 68, Вып. 8. С. 68-75.

9. Буц В.А. Коротковолновое излучение нерелятивистских заряженных частиц // Журнал технической физики. 1999. Т. 69, Вып. 5. С. 132-134.

10. Шулаев Н.С., Ефимова Г.Ф. Абдуллаев А.З. Исследование электрического поля, генерируемого осциллирующим зарядом // Сб. Матер. XIV Международ. науч. Надировских чтений. Атырау: Атырауский университет нефти и газа им. С. Утебаева, 2022. С. 23-27.

11. Буц В.А. «Длинноволновое» излучение заряженных частиц в средах с периодической неоднородностью // Радиотехника. 1997. № 9. С. 9-12.

Free Electrons with Electromagnetic Radiation]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1975, Vol. 115, Issue 2, pp. 161-197. [in Russian].

3. Dirac P.A.M. Fundamental Equations of Quantum Mechanics. *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 1925, Vol. 109, pp. 642-653.

4. Vodyanov N.G. Relyativistskaya model' ostsilliruyushchego elektrona v fizicheskoi sisteme elektron-vakuum [Relativistic Model of an Oscillating Electron in the Electron-Vacuum Physical System]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta – Vestnik Chuvashskogo Universiteta*, 2007, No. 2, pp. 12-20. [in Russian].

5. Shulaev N.S., Efimova G.F. Abdullaev A.Z. Izluchenie ostsilliruyushchego zaryada v kvadrupol'noi sisteme [Radiation of an Oscillating Charge in a Quadrupole System]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Natural and Technical Sciences*, 2022, No. 6 (169), pp. 19-22. [in Russian].

6. Tkachenko V.I., Tkachenko I.V. Izluchenie ostsilliruyushchego zaryada, dvizhushchegosya s nerelyativistskoi skorost'yu v periodicheski neodnorodnoi srede [Radiation of an Oscillating Charge Moving with a Nonrelativistic Velocity in a Periodically Inhomogeneous Medium]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki – Questions of Atomic Science and Technology*, 2008, No. 4, pp. 242-244. [in Russian].

7. McNally J.R. Preliminary Report on the Ball Lightning. *Materials of 2 Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society*. Gatlinburg, USA, 1960, Paper J-15, pp. 1-25.

8. Grigorev A.I., Kolbneva N.Yu., Shiryayeva S.O. Izluchenie elektromagnitnykh voln ostsilliruyushchei sil'no zaryazhennoi kaplei [Electromagnetic Emission of a Strongly Charged Oscillating Droplet]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 2016, Vol. 68, Issue 8, pp. 68-75. [in Russian].

9. Buts V.A. Korotkovolnovoe izluchenie nerelyativistskikh zaryazhennykh chastits [Shortwave Radiation of Nonrelativistic Charged Particles]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 1999, Vol. 69, Issue 5, pp. 132-134. [in Russian].

10. Shulaev N.S., Efimova G.F. Abdullaev A.Z. Issledovanie elektricheskogo polya, generiruemogo ostsilliruyushchim zaryadom [Study of the Electric Field Generated by an Oscillating Charge]. *Sbornik materialov XIV Mezhdunarodnykh nauchnykh Nadirovskikh chtenii* [Collection of Materials of the XIV International Scientific Nadir Readings]. Atyrau, Atyrauskii universitet nefi i gaza im. S. Utebaeva Publ., 2022, pp. 23-27. [in Russian].

11. Buts V.A. «Dlinnovolnovoe» izluchenie zaryazhennykh chastits v sredakh s periodichesko neodnorodnost'yu [«Long Wave» Radiation of Charged Particles in Media with Periodic Inhomogeneity]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 1997, No. 9, pp. 9-12. [in Russian].

REFERENCES

1. Ginzburg V.L. Izluchenie ravnomerno dvizhushchikhsya istochnikov (Effekt Vavilova-Cherenkova, Perekhodnoe izluchenie i nekotorye drugie yavleniya) [Radiation from Fast Moving Sources (Vavilov-Cherenkov Effect, Transition Radiation and Some Other Phenomena)]. *Akusticheskii zhurnal – Acoustical Physics*, 2005, Vol. 51, No. 1, pp. 24-36. [in Russian].

2. Zeldovich Ya.B. Vzaimodeistvie svobodnykh elektronov s elektromagnitnym izlucheniem [Interaction of

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шулаев Николай Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики, математики и физики, Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета, Стерлитамак, Россия

Nikolay S. Shulaev, doctor of technical sciences, professor, head of the of Computer science, mathematics and physics department, Institute of chemical technologies and engineering, Ufa state petroleum technological university, Sterlitamak, Russia

nshulayev@rambler.ru

Ефимова Галина Федоровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информатики, математики и физики, Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета, Стерлитамак, Россия

Galina F. Efimova, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, Computer science, mathematics and physics department, Institute of chemical technologies and engineering, Ufa state petroleum technological university, Sterlitamak, Russia

Dohle_e@mail.ru

Абдуллаев Аташ Зияддин оглы, магистрант, Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета, Стерлитамак, Россия

Atash Z. Abdullaev, undergraduate student, Institute of chemical technologies and engineering, Ufa state petroleum technological university, Sterlitamak, Russia

mr.atash.abdullaev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.12.2022; одобрена после рецензирования 19.01.2023; принята к публикации 25.01.2023.

The article was submitted 11.12.2022; approved after reviewing 19.01.2023; accepted for publication 25.01.2023.