

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ЩЕЛЕВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ДИАГРАММУ НАПРАВЛЕННОСТИ ТУРНИКЕТНОЙ ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ

Д.С. Клыгач, Н.И. Войтович

INFLUENCE OF PHASE DIAGRAMS OF THE ORIENTATION SLOT-HOLE RADIATORS ON THE ORIENTATION DIAGRAM TURNSTILE THE SLOT-HOLE AERIAL

D.S. Klygach, N.I. Voitovich

Рассматривается влияние фазовых диаграмм направленности щелевых излучателей на поведение диаграмм направленности (ДН) турникетной щелевой антенны. Приведены амплитудные и фазовые ДН щелевого излучателя и турникетной антенны. Проведено сравнение амплитудных ДН турникетной антенны, вычисленных без учета и с учётом фазовых ДН щелевых излучателей. Показано, что с ростом отношения ширины ленты к длине волны растёт угол разворота максимумов ДН относительно исходного положения, наблюдаемого при стремлении упомянутого отношения к нулю.

Ключевые слова: диаграмма направленности, щелевой излучатель, щелевая антенна.

In article influence of phase diagrams of an orientation of slot-hole radiators on behavior of diagrams of an orientation (DO) turnstile the slot-hole aerial is considered. Are resulted peak and phase DO a slot-hole radiator and turnstile antenna. Comparison peak DO turnstile antenna, calculated without taking into account and taking into account phase DO slot-hole radiators is spent. It is shown that with growth of the relation of width of a tape to length of a wave the corner of a turn of maxima DO concerning the starting position observed at aspiration of the mentioned relation to zero grows.

Keywords: directional pattern, slot radiator, slot antenna.

Введение

Турникетные антенны широко используются в качестве передающих антенн для излучения электромагнитных волн горизонтальной поляризации. Первые антенны, созданные в нашей стране и за рубежом для передачи телевизионных сигналов, представляли собой турникетные антенны, в которых в качестве излучающих элементов использованы, по существу, щелевые излучатели. В оригинальных работах щелевые излучатели назывались плоскостными вибраторами [1, 2]. В настоящее время турникетные антенны со щелевыми излучателями широко применяются для излучения телевизионных сигналов в метровом диапазоне волн. С переходом в дециметровый диапазон ранее предложенные конструкции антенн оказались не реализуемыми [3]. Задача создания новых, оригинальных, конструкций антенн обусловила интерес к теории щелевых антенн, в частности, к их фазовым диаграммам направленности.

Рассмотрим модель турникетной антенны, состоящую из двух взаимно перпендикулярных элементарных щелевых излучателей, выполненных на идеально проводящих лентах. Ленты имеют бесконечную протяжённость в направлении, параллельном оси щели (в направлении, параллельном оси Oz на рис. 1), и конечную ширину в ортогональном направлении. Щели на рис. 1 представлены имеющими конечную ширину. Предполагается, что при размещении антенны на местности ось Oz будет направлена вертикально. На рис. 1, б показано сечение турникетной антенны плоскостью, перпендикулярной к вертикальной оси антенны. Периметр каждой ленты в сечении равен L . Ширина каждой ленты соответственно равна $L/2$.

Рассмотрим амплитудную и фазовую ДН одного щелевого излучателя при различных значениях отношения периметра ленты L к длине волны λ : L/λ . Предположим, что щели расположены в цен-

Клыгач Денис Сергеевич – аспирант ЮУрГУ; 86kds@mail.ru

Войтович Николай Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры ЮУрГУ; vni@nexcom.ru

Klygach Denis Sergeevich – postgraduate student of SUSU; 86kds@mail.ru

Voitovich Nikolay Ivanovich – PhD, professor, head of the Electronics design department of SUSU; vni@nexcom.ru

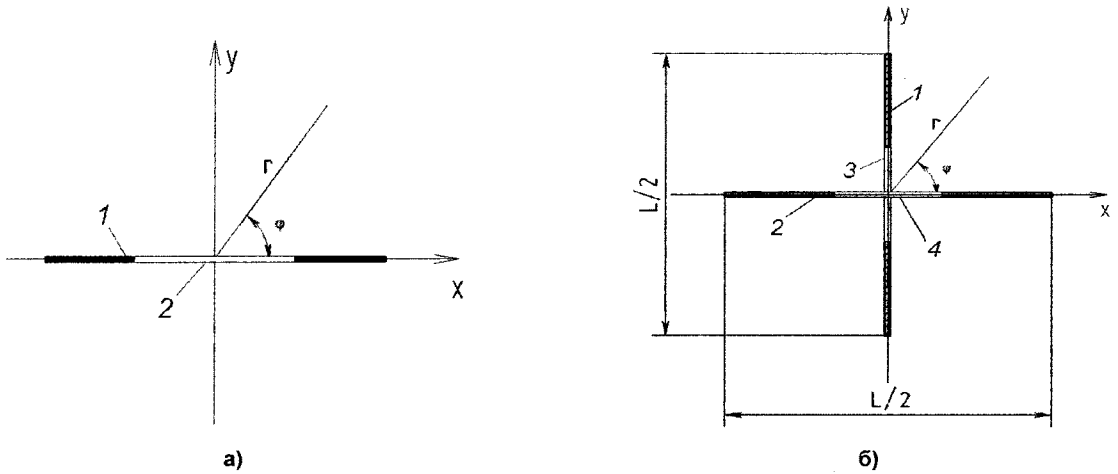


Рис. 1. Система координат (а): 1 – лента; 2 – щель на ленте; вид турникетной антенны в сечении ортогональном к вертикальной оси антенны (б): 1, 2 – ленты; 3 – щель на ленте 1; 4 – щель на ленте 2

три ленты. Тогда для вычисления комплексной ДН щелевого излучателя воспользуемся следующей формулой [4]:

$$H = i \frac{Ul}{r\lambda Z_B} \left[1 - 2 \sum_{p=0}^{\infty} i^{2p+1} \frac{Js'_{2p+1}(\beta C_0, 0)}{Hs_{2p+1}^{(2)}(\beta C_0, 0)} \times \right. \\ \left. \times Hs_{2p+1}^{(2)}(\beta C_0, 0) se_{2p+1}\left(\beta C_0, \frac{\pi}{2}\right) se_{2p+1}(\beta C_0, \varphi) \right], \quad (1)$$

где H – напряжённость магнитного поля в дальней зоне излучателя; U – напряжение; l – длина щелевого вибратора; (r, φ) – полярные координаты; Z_A – волновое сопротивление свободного пространства; $Js'_{2p+1}(\beta C_0, 0)$ – производная радиальной нечетной функции Матье–Бесселя $2p+1$ порядка $Js_{2p+1}(\beta C_0, \beta r)$ от аргумента βr по переменной r при $r = r_0 = 0$; $Hs_{2p+1}^{(2)}(\beta C_0, 0)$ – производная радиальной нечетной функции Матье–Ханкеля второго рода $2p+1$ порядка $Hs_{2p+1}^{(2)}(\beta C_0, \beta r)$ от аргумента βr по переменной r при $r = r_0 = 0$; $se_{2p+1}(\beta C_0, \varphi)$ – угловая нечетная функция Матье $2p+1$ порядка для параметра βC_0 от аргумента φ [5, 6]. При выполнении данной работы для функции $se_{2p+1}(\beta C_0, \varphi)$ использована нормировка, приведенная в [7]. $2C_0$ – расстояние между фокусами, $C_0 = \frac{L}{4}$; β – постоянная распространения, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Поясним величину параметра C_0 . Формула (1) получена как частный случай решения задачи дифракции плоской волны на эллиптическом цилиндре путем перехода от эллипса к ленте. При переходе от эллипса к ленте малая полуось эллипса принимается равной нулю. При этом большая по-

луось эллипса равна расстоянию от начала координат до края ленты. Таким образом, постоянная C_0 при переходе к ленте оказывается равной половине ширины ленты.

При вычислении комплексных ДН множитель $\frac{l}{\lambda r Z_B}$ перед скобками в формуле (1) приравняем к единице. Обозначим комплексную амплитуду источника первого щелевого излучателя \dot{U}_{m1} , комплексную амплитуду источника второго щелевого излучателя \dot{U}_{m2} . Тогда комплексная диаграмма направленности первого щелевого излучателя $\dot{F}_1(\varphi)$ пропорциональна \dot{U}_{m1} и функции $\dot{H}(\varphi)$, вычисляемой по (1). Комплексная диаграмма направленности второго щелевого излучателя $\dot{F}_2(\varphi)$ пропорциональна \dot{U}_{m1} и функции $\dot{H}\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)$.

При вычислениях по формуле (1) применялась нормировка эллиптических функций, предложенная в работе [7]. Основным достоинством применяемой нормировки и предложенной в [7] системы координат является то, что формулы для расчёта составляющих напряжённости поля не $2C_0$ содержат нормирующих множителей, вычисление которых сопряжено с громоздкими расчётами.

Фазовую ДН щелевого излучателя вычислим по формуле

$$\theta(\varphi) = \arctg \left(\frac{\text{Im} \dot{H}(\varphi)}{\text{Re} \dot{H}(\varphi)} \right). \quad (2)$$

Здесь $\theta(\varphi)$ – функция зависимости фазы напряжённости поля от полярного угла φ ; $\text{Im}(\dot{H})$ – мнимая часть комплексной ДН щелевого излучателя; $\text{Re}(\dot{H})$ – реальная часть комплексной ДН щелевого излучателя.

Для вычисления комплексной ДН по формуле

(1) и фазовой ДН по формуле (2) была написана программа в среде MATLAB. На рис. 2, 4 и 6 приведены амплитудные ДН, на рис. 3, 5 и 7 – фазовые ДН, полученные в результате расчётов по формулам (1) и (2) при различных значениях L/λ

Представленные на рис. 4 и 6 амплитудные ДН с графической точностью совпадают с диаграммами направленности в работе [4, с. 226].

Перейдём теперь к рассмотрению ДН турникетной антенны.

Для формирования круговой диаграммы направленности расположим ленты взаимно перпендикулярно, как указано на рис. 1. Пусть амплитуда

напряжения $|\dot{U}_{m1}|$ источника, возбуждающего щель 2 на ленте 1, равна амплитуде напряжения $|\dot{U}_{m2}|$ источника, возбуждающего щель 4 на ленте 3, фазы напряжений \dot{U}_{m1} и \dot{U}_{m2} отличаются друг от друга на 90° : $\dot{U}_{m2} = \dot{U}_{m1} e^{i\frac{\pi}{2}}$.

Тогда комплексная ДН первого щелевого излучателя $\hat{F}_1(\varphi)$ пропорциональна \dot{U}_{m1} и напряжённости магнитного поля $\dot{H}(\varphi)$, найденной по (1) в предположении, что множитель $U=1$. Комплексная ДН второго щелевого излучателя $\hat{F}_2(\varphi)$

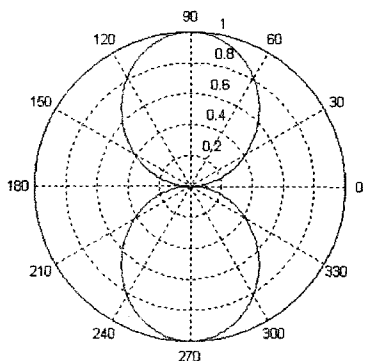


Рис. 2. Амплитудная ДН щелевого излучателя, $L/\lambda = 1$

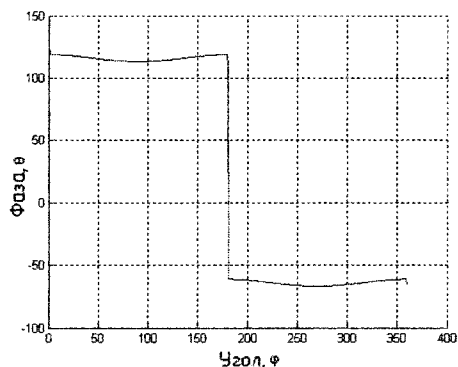


Рис. 3. Фазовая ДН щелевого излучателя, $L/\lambda = 1$

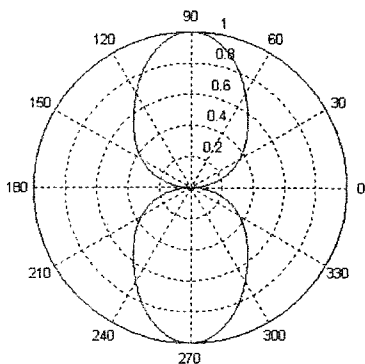


Рис. 4. Амплитудная ДН щелевого излучателя, $L/\lambda = 2$

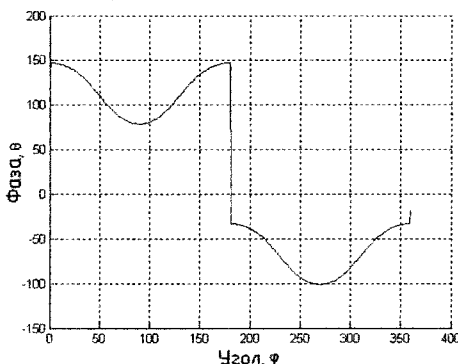


Рис. 5. Фазовая ДН щелевого излучателя, $L/\lambda = 2$

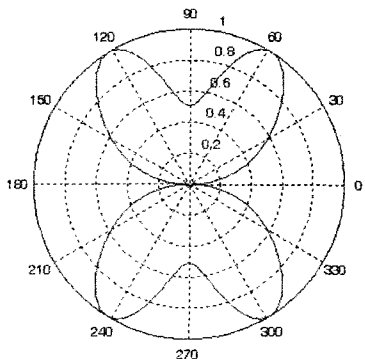


Рис. 6. Амплитудная ДН щелевого излучателя, $L/\lambda = 4$

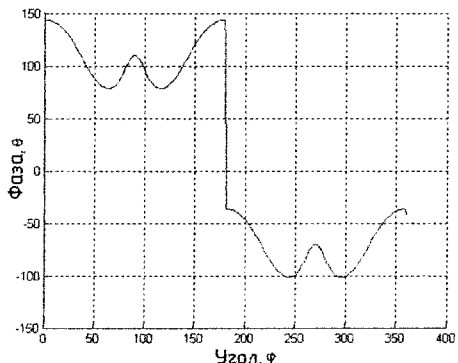


Рис. 7. Фазовая ДН щелевого излучателя, $L/\lambda = 4$

пропорциональна \dot{U}_{m2} и напряжённости магнитного поля $\dot{H}(\varphi + \frac{\pi}{2})$, найденной по (1) в предположении, что множитель $U = 1$.

Сравним диаграммы направленности турникетной антенны, вычисленные без учёта фазовых ДН щелевых излучателей (что заведомо неверно), с диаграммами направленности, вычисленными с учётом фазовых ДН излучателей. Без учёта фазовых ДН излучателей иногда делают оценку амплитудной ДН турникетной антенны, когда в распоряжении имеются только экспериментально измеренные амплитудные ДН излучателей.

В первом случае (без учёта фазовых ДН излучателей) амплитудную ДН турникетной антенны вычислим по формуле

$$F^-(\varphi) = \sqrt{|\dot{F}_1(\varphi)|^2 + |\dot{F}_2(\varphi)|^2}. \quad (3)$$

Амплитудную ДН турникетной антенны во втором случае (с учётом фазовых ДН излучателей) вычислим по формуле

$$F^+(\varphi) = |\dot{F}_1(\varphi) + \dot{F}_2(\varphi)|. \quad (4)$$

Полученные результаты приведены на рис. 8–11, на которых сплошной линией показаны амплитудные ДН $F^-(\varphi)$, вычисленные без учёта фазовых

ДН по формуле (3), а пунктирной – амплитудные ДН $F^+(\varphi)$, вычисленные с учётом фазовых ДН щелевого излучателя по формуле (4).

Как показали результаты численных исследований, при $L/\lambda < 2$ амплитудные ДН $|F^+(\varphi)|$ и $|F^-(\varphi)|$ практически совпадают друг с другом (рис. 8). Амплитудная ДН $F^+(\varphi)$ поворачивается против хода часовой стрелки (рис. 9, 10). В промежутке $2 \leq L/\lambda \leq 3$ расхождения диаграмм направленности становятся значительными.

При значении $3 \leq L/\lambda \leq 4$ амплитудные ДН турникетной антенны, вычисленные с учётом и без учёта фазовых ДН излучателей, по форме практически совпадают. Отличие заключается в том, что амплитудная ДН, вычисленная с учётом фазовых ДН, повернута относительно амплитудной ДН, вычисленной без учёта фазовых ДН. На рис. 12 и 13 представлены амплитудные и фазовые ДН турникетной антенны при разности фаз напряжений $\pm 90^\circ$. Как видно из графика на рис. 13, фазовая ДН турникетной антенны с излучателями в виде щелей на ленте ограниченных размеров отличается от линейной зависимости.

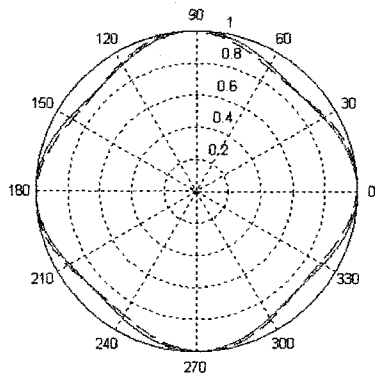


Рис. 8. Амплитудная ДН турникетной антенны, $L/\lambda = 1$:

— амплитудная ДН $F^-(\varphi)$;
 - - амплитудная ДН $F^+(\varphi)$

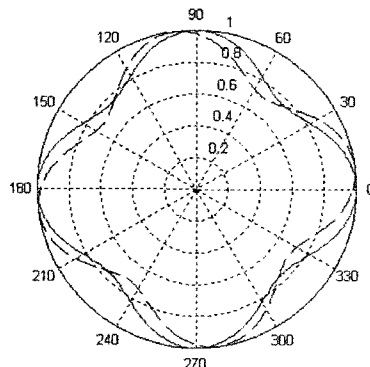


Рис. 9. Амплитудная ДН турникетной антенны, $L/\lambda = 1,5$:

— амплитудная ДН $F^-(\varphi)$;
 - - амплитудная ДН $F^+(\varphi)$

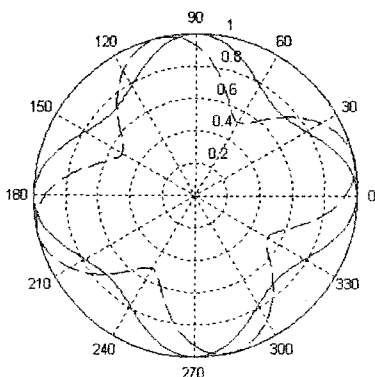


Рис. 10. Амплитудная ДН турникетной антенны, $L/\lambda = 2$

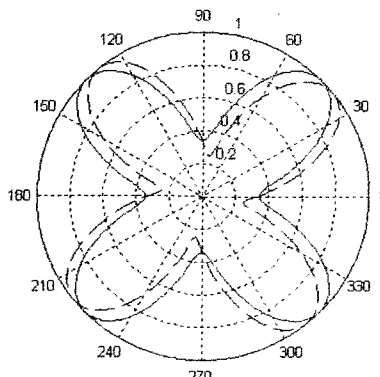


Рис. 11. Амплитудная ДН турникетной антенны, $L/\lambda = 3$

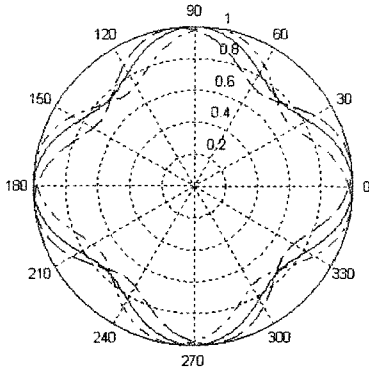


Рис. 12. Амплитудная ДН турникетной антенны:
 — ДН без учёта фазовых ДН излучателей;
 - - амплитудная ДН, сдвиг по фазе между напряжениями излучателей $+90^\circ$;
 — — диаграмма с разностью фаз между напряжениями излучателей -90°

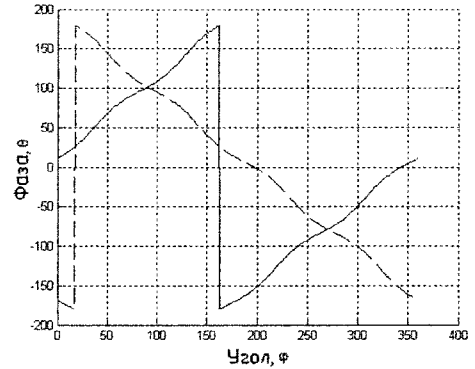


Рис. 13. Фазовая ДН турникетной антенны:
 — ДН при разности фаз между напряжениями излучателей $+90^\circ$;
 - - ДН при разности фаз между напряжениями излучателей -90°

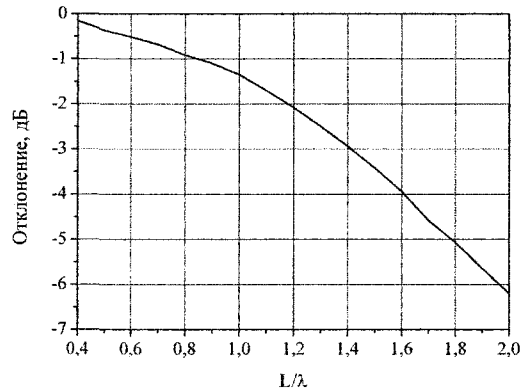


Рис. 14. Зависимость отклонения амплитуды диаграммы направленности от ширины ленты

На рис. 14 приведен график отклонения амплитудной ДН от круга в зависимости от ширины лент, из которых построена турникетная антенна.

Найденная зависимость разворота максимумов ДН от исходного, совпадающего с положением ленты в пространстве, подтверждается данными экспериментов, полученными на макете турникетной антенны, в которой ленты щелевых излучателей были изготовлены из тонкой жести.

Анализ численных экспериментов показал, что отклонения ДН турникетной антенны от круговой ДН не превышают величину $\pm 1,5$ дБ при отношении периметра ленты к длине волны менее величины 1,4.

Выводы

1. При расчёте ДН щелевой турникетной антенны практически важно учитывать наряду с амплитудными ДН фазовые ДН щелевых излучателей, образующих турникетную антенну.

2. Отклонения ДН турникетной антенны от круговой ДН не превышают величину $\pm 1,5$ дБ при отношении периметра ленты к длине волны менее величины 1,4.

3. С ростом отношения ширины ленты к длине волны наблюдается увеличение угла разворота максимумов амплитудных ДН относительно исходного положения максимумов, наблюдаемого при стремлении упомянутого отношения к нулю. Направление разворота ДН определяется опережением (отставанием) по фазе напряжения источников возбуждения щелей.

4. Фазовая ДН турникетной антенны с излучателями в виде щелей на ленте ограниченных размеров отличается от линейной зависимости, характерной для излучателей с ДН в виде косинусоидальной и синусоидальной зависимостью напряжённостей полей от азимутального угла.

Литература

1. Пат. 2480154 США, МКИ H 01 Q 0/0. Antenna / R.W. Masters, N.J. Erlton; assignator to RadioCorporation of America, a corporation of Delaware. – № 574899; заявл. 27.01.45; опубли. 30.08.49, НКИ 343/700 MS.

2. А.с. № 69974 СССР. Плоскостной вибратор / Б.В. Брауде. – Приоритет 12.04.1946; опубли.

31.12.1947. Брауде, Б.В. Новая широкополосная УКВ антенна для телевидения // *Радиотехника*. – 1947. – № 7.

3. Клыгач, Д.С. Турникетная антенна для вещания цифрового телевидения / Д.С. Клыгач // *Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук: тр. 52-й науч. конф. МФТИ. Ч. 1. Радиотехника и кибернетика*. – М.: МФТИ, 2009. – Т. 1. – С. 149–154.

4. Антенны УКВ: в 2 ч. / Г.З. Айзенберг, В.Г. Ямпольский, О.Н. Терешин; под ред. Г.З. Айзенберга. – М.: Связь, 1977. – Ч. 1. – 384 с.

5. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / под ред. М. Абрамовица и И. Стигана; пер. с англ. В.А. Диткина и Л.Н. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.

6. Янке, Е. Специальные функции (формулы, графики, таблицы) / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш. – М.: Наука, 1964. – 344 с.

7. Бруснецов, Н.П. О волновых функциях эллиптического цилиндра / Н.П. Бруснецов // *Вестник Московского университета. «Математика»*. – 1954. – № 9.

Поступила в редакцию 29 октября 2010 г.